

Adaptivität von freigeformten Flächentragwerken

Möglichkeiten zur Steigerung der Effizienz von

Faserverbundstrukturen im Bauwesen

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur

an der Fakultät Architektur und Urbanistik

der

Bauhaus-Universität Weimar

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Christian Heidenreich

geb. am 13.07.1979

Weimar, 2015

Gutachter

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Ruth

Prof. Dipl.-Ing. Manfred Grohmann

Tag der Disputation: 08.02.2016

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit fokussiert die Optimierung freigeformter adaptiver Faserverbundflächentragwerke auf Basis einer entwickelten und auf einem parametrischen Gesamtmodell basierenden Entwurfsmethode. Die Übertragung adaptiver, natürlich inspirierter Vorgänge stellt eine weitreichende Inspirationsquelle dar. Adaptive Tragwerke können unter Anwendung von Smart Materials als materialsparende, filigrane Tragwerke ausgeführt werden. Die Erfüllung der Grenzzustände der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit wird nicht allein über die Querschnittsabmessungen sichergestellt. Die notwendige Bauteilsteifigkeit kann vielmehr durch Eintragung von Aktivierungsenergie (*Operational Energy*) realisiert werden. Auf diese Weise kann die aufgrund der Bauteilabmessungen gebundene Energie (*Embodied Energy*) minimiert werden. Die entwickelte Entwurfsmethode ermöglicht die Auslegung und Optimierung materialminimierter Schalentragsysteme in einem mehrstufigen Prozess. Hierbei wird aus tragwerksplanerischer Sicht die numerische Formfindung, die statische Berechnung und die Aktor- und Sensorpositionierung berechnet. Zudem werden Analysen hinsichtlich der Nachhaltigkeit auf Basis einer Lebenszyklusanalyse durchgeführt. Aufgrund der unterschiedlichen, sich aber gegenseitig beeinflussenden Kriterien, ist eine Optimierung durchzuführen. In der vorliegenden Arbeit wird ein Ansatz zur Definition zulässiger Ökobilanzkennwerte von Smart Materials auf Basis der Energiedifferenz zwischen einer passiven und einer adaptiven Struktur vorgestellt. Anhand dieser Kennwerte kann die Entwicklung zukünftiger Smart Materials unter dem Aspekt der ganzheitlichen Nachhaltigkeit erfolgen. Die Allgemeingültigkeit und Übertragbarkeit der Entwurfsmethode auf weitere Tragsysteme im Bauwesen und speziell anderer Materialkonstellationen wird anhand verschiedener Beispiele aufgezeigt.

Abstract

The present study focuses on the optimization of free-form adaptive Composite Structures. In this case a developed and based on a parametric overall model design method is used. The transmission of natural adaptive operations is an extensive source of inspiration. Adaptive structures can be carried out using smart materials as a material-saving, filigree structures. The fulfillment of the ultimate and serviceability limit states is ensured not only on the cross-sectional dimensions. The necessary component stiffness can rather be realized by activation energy (*Operational Energy*). The cross-section of the building elements and its *Embodied Energy* can be minimized. The developed design method enables the design and optimization material-minimized shell structures in a multistage process. Here, the numerical form finding, structural calculations and actuator and sensor positioning is calculated from structural point of view. In addition, analysis are carried out on the basis of a life cycle analysis in terms of sustainability. Due to the different, but mutually influencing criteria an optimization is carried out. In this study, an approach for defining permissible LCA characteristics of smart materials based on the energy difference between a passive

and an adaptive structure is presented. Based on these parameters, the development of future Smart Materials can be carried out in terms of holistic sustainability. The generality and portability of the presented design method to other structural and material systems in the building sector will be demonstrated by means of various examples.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	III
Abbildungsverzeichnis	VII
Formelzeichen und Abkürzungen	XIII
Tabellenverzeichnis	XV
1 Einführung	1
1.1 Freiformen und Leichtbau in der Architektur	1
1.2 Adaptivität und Faserverbundbau	1
1.3 Motivation	2
1.4 Ziel und Ansatz	3
1.5 Aufbau der Arbeit	4
2 Adaptivität und Smart Materials	7
2.1 Adaptive Systeme	7
2.2 Smart Materials	11
2.2.1 Materialentwicklung	11
2.2.2 Smart Materials im Überblick	12
2.2.3 Auswahltool für Smart Materials	14
2.2.4 Smart Materials im Bauwesen	15
2.3 Aspekte der Ausfallsicherheit	17
3 Schalen im Bauwesen — Form, Tragverhalten, Bauweisen, Optimierung	19
3.1 Formen von Schalentragwerken	19
3.1.1 Mathematisch beschreibbare Schalen	20
3.1.2 Freie Schalen	20
3.2 Das Tragverhalten von Schalentragwerken	21
3.2.1 Berechnungsgrundlagen für Scheiben- und Plattentragwerke	21
3.2.2 Berechnungsgrundlagen für Schalentragwerke	22
3.3 Optimierung von Schalentragwerken	24
3.3.1 Topologieoptimierung	24
3.3.2 Formfindung und Formoptimierung	27
3.4 Die Bauweisen von Schalentragwerken	32
3.4.1 Schalentragwerke in Stahlbauweise	32
3.4.2 Schalentragwerke in Holzbauweise	32

3.4.3	Schalentragwerke in Betonbauweise	33
3.4.4	Schalentragwerke in Faserverbundbauweise	35
3.5	Evolutionäre Optimierung im Bauwesen	43
3.5.1	Evolutionäre Algorithmen	43
3.5.2	Zusammenfassung der Evolutionären Algorithmen und Unterschiede zu traditionellen Optimierungsverfahren	45
3.5.3	Ablauf einer evolutionären Optimierung	46
3.5.4	Weitere Optimierungsverfahren	48
4	Nachhaltigkeit im Bauwesen	51
4.1	Gebäudeökobilanzierung	52
4.1.1	Umweltproduktdeklarationen	52
4.2	Nachhaltigkeitsbetrachtung von Faserverbundwerkstoffen	55
4.2.1	Die <i>Embodied Energy</i> als Indikator für Faserverbundwerkstoffe . . .	55
4.2.2	Der <i>Carbon Footprint</i> als Indikator für Faserverbundwerkstoffe . . .	56
4.2.3	Die <i>Reißlänge</i> als Indikator für Faserverbundwerkstoffe	56
4.3	Nachhaltigkeitsbetrachtung adaptiver Systeme	57
5	Parametrisierung im Bauwesen	61
5.1	Parametrische Modelle	62
5.1.1	Parametrische CAD-Modelle	63
5.1.2	Parametrische Tageslichtanalysemodelle	65
5.1.3	Parametrische Modelle zur statischen Berechnung	66
5.1.4	Parametrische Modelle zur Lebenszyklusanalyse von Tragwerken . .	71
5.1.5	Parametrische Modelle zur Analyse adaptiver Tragwerke	74
5.2	Fazit	79
6	Adaptive Faserverbundschalentragwerke	83
6.1	Allgemeines	83
6.2	Formulierung der Optimierungsaspekte	83
6.2.1	Aspekte zur statischen Schalenoptimierung	84
6.2.2	Aspekte zur ökologischen Optimierung	85
6.3	Grundlagen und Annahmen	86
6.3.1	Geometrie- und Modellerzeugung	86
6.3.2	Formfindung	87
6.3.3	Materialbeschreibung	88
6.3.4	Belastung	91
6.3.5	Statische Berechnung adaptiver Tragwerke	92
6.4	Optimierung der adaptiven Schalenstruktur	94
6.4.1	Optimierung der Schalenform	94
6.4.2	Optimierung der Materialkomposition	97
6.4.3	Optimierung der adaptiven Materialkomposition	98
6.5	Darstellung ausgewählter Optimierungsergebnisse	106

6.5.1	Beschreibung der passiven/adaptiven Tragstruktur	106
6.5.2	Überprüfung der Funktionsmaterialeigenschaften und Sensorpositio- nierung	109
6.5.3	Weiterführende dynamischen Analysen	110
6.6	Fazit	111
7	Anwendungsbeispiele	113
7.1	Adaptive Stahlbetonschale	114
7.1.1	Vorbemerkungen	114
7.1.2	Geometrie- und Berechnungsmodell	114
7.1.3	Berechnung und vereinfachte Nachweise	117
7.1.4	Fazit	117
7.2	Adaptive Hyparschalenkonstruktion	119
7.2.1	Vorbemerkungen	119
7.2.2	Geometrie- und Berechnungsmodell	121
7.2.3	Berechnung und vereinfachte Nachweise	122
7.2.4	Zuschnitt der Membrandachhaut	125
7.2.5	Fazit	128
7.3	Adaptive Fassaden- und Aussteifungskonstruktion	129
7.3.1	Vorbemerkungen	129
7.3.2	Geometrie- und Berechnungsmodell	130
7.3.3	Berechnung und vereinfachte Nachweise	135
7.3.4	Fazit	138
8	Zusammenfassung und Ausblick	139
	Literatur	142
A	Softwaregrundlagen	155
A.1	parametrische Designsoftware Rhinoceros3D und Grasshopper	155
A.2	Strukturanalysesoftware <i>Sofistik</i>	156
A.3	parametrische Finite-Elemente-Berechnungssoftware	157
B	Schnittstellenentwicklung — StrukturDatenTransformator	159

Abbildungsverzeichnis

2.1	Adaptives Verschattungselement nach Wüstenhagen und Heidenreich [WH15]	8
2.2	Aktorische und sensorische Betrachtung von Fachwerkstrukturen	10
2.3	zeitliche Einordnung der Materialentwicklungen aus Ashby [Ash99]	12
2.4	Spannungs-Dehnungs-Diagramm für Smart Materials nach Lagoudas [Lag08]	13
2.5	Smart Materials im Bauwesen — links: angepasstes Spannungs-Dehnungs-Diagramm nach Lagoudas [Lag08] aus [RGH12]; rechts: angepasstes Arbeitsfrequenz-Diagramm nach Schultz und Petry [SP04] aus [RGH12]	13
2.6	Auswahlmatrix sensorischer Wirkung [RGH12]	14
2.7	Auswahlmatrix aktorischer Materialien [RGH12]	14
2.8	Eigenschaften von Smart Materials, erweiterte Grafik des Ansatzes von [Lag08] aus [RGH12]	15
2.9	FGL-Stäbe als Bewehrung in Betonbalken aus Sawaguchi et al. [SKO ⁺ 06]	17
3.1	Schalen als Rotationsflächen — Krümmungsmaß nach Gauß (links: Buckelfläche, rechts: Sattelfläche [RG10])	20
3.2	Kurmuschel in Sassnitz, Ulrich Müther, 1987	21
3.3	Flächentragwerke — von links nach rechts: Scheibentragwerk, Plattentragwerk, Schalentragwerk	21
3.4	links: Scheibenbeanspruchung, rechts: Plattenbeanspruchung nach Williams [Wil14]	22
3.5	links: Schalenelement mit Hauptkrümmungsradien; rechts: Membrankräfte in Schalen beliebiger Form ([Mar12])	23
3.6	Darstellung eines Elementes einer flachen Schale [Mar12]	24
3.7	Strukturoptimierung nach Ramm [Lip07]	25
3.8	geometrische und materielle Topologieoptimierung [Mau98]	25
3.9	Materielle Topologieoptimierung [MSR98]	26
3.10	links: Topologieoptimierung einer gekrümmten Oberfläche mit der 'homogenization method', rechts: Topologieoptimierung einer Schalenstruktur über Volumenrestriktionen im Designraum [LAS14]	26
3.11	ergebnisbasierte Glättung — Fraunhofer IFAM [BFH03]	27
3.12	Minimalform als Seifenhaut	29
3.13	shells for shelter Pavillon [RHP12]	33
3.14	Elefantenhaus Zoo Zürich (Fotos: Vector Foiltec in [San14])	33
3.15	Brasilia - links: Nationalkongress, rechts: Nationalbibliothek	34

3.16	Rolex Learning Center in Lausanne, links: FE-Modell, rechts: während der Bauphase [BGW ⁺ 10]	34
3.17	CNC-Fräsform für GFK-Versuchsbau MYKO, Foto: Forschungsgruppe Materialgerechtes Entwerfen und Konstruieren mit faserverstärkten Kunststoffen	35
3.18	Forschungspavillon (links: Geometrie), schalungsfreie Faseranordnung durch Roboternutzung (rechts) [WMR ⁺ 13]	36
3.19	Koordinatensysteme einer ebenen UD-Schicht nach VDI 2014 Blatt 3 [VDI06]	36
3.20	Laminat- und UD-Schichtdarstellung nach VDI 2014 Blatt 3 [VDI06]	36
3.21	links: Wirkungskomponenten in Faserrichtung, rechts: 3-Schicht-Laminat [MW90]	37
3.22	Laminatverformungen [VDI06]	38
3.23	Beulverhalten dünnwandiger Schalen [VDI06]	39
3.24	Rissverlauf in einem T-Rohr (links: Reißlackverfahren, rechts: CAIO-Faserverlauf) [Mol11]	40
3.25	Schematischer Ablauf einer CAIO-Optimierung nach [VDI12]	41
3.26	Zusammenhang zwischen Kurzfaserausrichtung und Steifigkeit nach Gruber und Wartack [GW13]	41
3.27	Zusammenhang zwischen Faserausrichtung und Steifigkeit bei Laminaten nach Michaeli und Wegener [MW90]	41
3.28	Hauptspannungstransformation des Spannungstensors	42
3.29	zeitliche Einordnung evolutionärer Algorithmen nach Weicker [Wei99] . . .	43
3.30	Ablauf einer Optimierung mit evolutionären Algorithmen, [Wei99]	47
3.31	Abstrakte Darstellung einer Pareto-Front für einen Entwurfsraum mit zwei Zielkriterien nach Winslow [Win14]	48
3.32	Einkriterielle Optimierung mit Nebenbedingungen einer 4-Punkt gelagerten Stahlbetondeckenplatte [HHR ⁺ 14b]	49
4.1	Reduzierung des Primärenergiebedarfs von Joost Hartwig nach [FHHZ13] .	52
4.2	LCA Module	53
4.3	Auslastung und GWP für eine einachsige gespannte Deckenplatte [HHR ⁺ 14b]	55
4.4	Gegenüberstellung Carbon Footprint (links: pro kg, rechts: prozentual) nach [Fib14]	57
4.5	Reißlänge ausgewählter Faserwerkstoffe, Werte nach [RC09]	58
5.1	parametrische Modelle — Darstellung der notwendigen Parameter	63
5.2	Grundaufbau parametrischer Geometriemodelle	64
5.3	parametrische Modellierung [SBK12] des Sonnenhauses des Sokrates nach Treberspurg [Tre99]	64
5.4	Lichtanalysemodell auf Basis parametrischer Geometriemodellierung	65
5.5	Sonnenhaus des Sokrates — Ergebnis Tageslichtanalyse (Auszug) nach Schneider et al. [SBK12]	65
5.6	Statikanalysemodell auf Basis parametrischer Geometriemodellierung	66

5.7	Schnittstelle zur Datenübertragung parametrischer CAD-Modelle an Berechnungssoftware	68
5.8	Datenübertragung zwischen Modellierungs- und Berechnungssoftware	69
5.9	Sonnenhaus des Sokrates — Auswertung der statischen Berechnung und Optimierung	70
5.10	parametrische Lebenszyklusoptimierung nach Heidenreich et al. [HHR14a] .	71
5.11	Lebenszyklusanalysemodell auf Basis parametrischer Geometriemodellierung	72
5.12	Deckenplattenoptimierung nach Hollberg et al. [HHR ⁺ 14b]	73
5.13	Schalenoptimierung nach Heidenreich et al. [HHR14a]	73
5.14	Analysemodell der Betrachtung adaptiver Strukturen für statische Berechnungen	75
5.15	Formveränderliche Fassadenlamellen	75
5.16	Analysemodell der Betrachtung adaptiver Strukturen für statische Berechnungen — Spezialfall Auflager- und Bauteillängenadaption	76
5.17	Analysemodell der Betrachtung adaptiver Strukturen für statische Berechnungen — Spezialfall: Berücksichtigung adaptiver Materialparameter	77
5.18	parametrische Schalenkonstruktion mit variabler Lastanordnung	78
5.19	Analysemodell der Betrachtung adaptiver Strukturen für statische Berechnungen — Spezialfall: Sensoranordnung	79
5.20	Analyse der Membranspannungen und Faserorientierung einer Schalenstruktur [HR14b]	81
6.1	Freiformschalenentwicklung mittels Hängeform	84
6.2	4-knotiges-‘quad‘-Element nach [AG13]	87
6.3	Schnittgrößen am 4-knotigen-‘quad‘-Element nach [AG13]	87
6.4	gewählter Schichtenaufbau für Freiformschale mit Winkelangabe	89
6.5	Windbelastung	92
6.6	Verformungsverhalten in Bezug auf Schalenhöhe, Schalenstärke und E-Modul	95
6.7	Verformungsverhalten der Vorzugsvariante ($d = 0,025$ m) in Bezug auf Schalenhöhe und E-Modul	96
6.8	Lastverformungskurven ($h=1,25$ m, $E\text{-Modul} = 20.000$ N/mm ² ; $h=1,25$ m, $E\text{-Modul} = 70.000$ N/mm ²)	97
6.9	Lastverformungskurve der Vorzugsvariante ($h=0,90$ m, $E\text{-Modul} = 40.000$ N/mm ²)	97
6.10	Einfluss Faserrichtung-Kraftfluss der Freiformschale	98
6.11	Ausrichtung der Faserrichtung	99
6.12	Evaluation der E-Modul-Dehnungs-Verformungsbeziehung	100
6.13	Evaluation der E-Modul-Dehnungs-Energie-Verformungsbeziehung	101
6.14	Schalenvariante ($E\text{-Modul} = 50.000$ N/mm ² , $\text{Dehnung} = 0,025$ %) — Dehnungsaktivierung	102
6.15	Lastverformungsverhalten der Varianten entsprechend Abb. 6.13	102
6.16	Energiebetrachtungen adaptiver/passiver Systeme	104
6.17	Darstellung Untersuchungsvariante	106

6.18	Gegenüberstellung Untersuchungsvariante passiv/adaptiv	107
6.19	Ergebnisgegenüberstellung passiv-adaptiv	108
6.20	Variante Nr. II — optimierte Faseranordnung	109
6.21	Variante Nr. II - Sensoranordnung	110
6.22	Adaptive Ertüchtigung hinsichtlich Erdbeben	110
7.1	Adaptive Stahlbetonschale — Ausgangsgeometrie ([HHR14a]) und variable Geometrieparameter	115
7.2	Adaptive Stahlbetonschale — parametrisches Untersuchungsmodell nach [HHR14a]	115
7.3	Adaptive Stahlbetonschale — Formfindung	116
7.4	Adaptive Stahlbetonschale — Ergebnis der Formfindung	116
7.5	Adaptive Stahlbetonschale — FGL-Stäbe als Bewehrung	116
7.6	Adaptive Stahlbetonschale — Belastung	117
7.7	Adaptive Stahlbetonschale — Spannungsauswertung	118
7.8	Screenhaus.SOLAR [RG10]	119
7.9	Chapel Lomas de Cuernavaca [HGP08]	120
7.10	Screenhaus.SOLAR — Laservermessung unter Schneebelastung (links: Ruth und Gump [RG10], rechts: Jörg Braunes (Professur InfAr — Informatik in der Architektur, Bauhaus-Universität Weimar)	120
7.11	Screenhaus.SOLAR — Geometrie (links) und FE-Modell mit Windbelastung (rechts)	121
7.12	Screenhaus.SOLAR — parametrisches Untersuchungsmodell	121
7.13	Screenhaus.SOLAR - Bemessungsvariante Nr. 1 — Konstruktions- und Querschnittsabmessungen und verformte Struktur	123
7.14	Screenhaus.SOLAR — ökologischer Rucksack [RG10]	124
7.15	Screenhaus.SOLAR — Aussteifungselemente (re. Foto: Philipp in [RHP12])	124
7.16	Screenhaus.SOLAR — Bemessungsvariante Nr. 2, Geometrie und Kontrollknoten	126
7.17	Screenhaus.SOLAR — Bemessungsvariante Nr. 2, Darstellung der aufgetragten Vorspannung	126
7.18	Screenhaus.SOLAR — Bemessungsvariante Nr. 2, Darstellung der Verformungslinien der Kontrollknoten	126
7.19	Screenhaus.SOLAR — Bemessungsvariante Nr. 2, Sensorpositionen (max. Verformung in y- (links) und in z-Richtung (rechts)	127
7.20	Screenhaus.SOLAR — Bemessungsvariante Nr. 2, Zuschnittflächen	127
7.21	seilverspannte Fassade des Eingangsgebäudes der Universität Bremen [Stö01]	129
7.22	Eiermuseum Winden am See nach Fertigstellung und Schnitt [Cza11]	129
7.23	Aussteifungsgrundsystem	130
7.24	Versuchsbau, Isometrie (Alexander Hollberg, Bauhaus-Universität Weimar, FOGEB)	131
7.25	Versuchsbau, Grundriss und Schnitt (Sandra Fuchs, Bauhaus-Universität Weimar, FOGEB)	131

7.26	Versuchsbau, parametrisches Geometriemodell (links), FE-Modell (rechts)	132
7.27	Versuchsbau — parametrisches Untersuchungsmodell	132
7.28	Versuchsbau — LF2 'Wind'	134
7.29	Versuchsbau — LF3 'Nutzlast'	134
7.30	Ergebnisse der multikriteriellen Optimierung (Pareto-Front)	136
7.31	ausgewählte Ergebnisse und Strukturvarianten	137
7.32	Aussteifung in drei Raumrichtungen	137
7.33	adaptive Ertüchtigung der Variante III	138
A.1	Gesamtüberblick Sofistik Datenbasis CDB [SOF08]	157
A.2	Karamba3D - Panel in Grasshopper3D	157
B.1	Erstellung Berechnungsdatei und Datenübertragung	160
B.2	Datenimport aus Berechnungsdatenbank in CAD-Modellierungsumgebung	160
B.3	Ablauf einer Einzelverarbeitung	161
B.4	Ablauf einer Stapelverarbeitung	162

Formelzeichen und Abkürzungen

Abkürzungen

FVK	faserverstärkte Kunststoffe
GFK	glasfaserverstärkte Kunststoffe
CFK	kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe
FGL	Formgedächtnislegierungen
K	Gauß'sche Krümmung
R	Radius
GZT	Grenzzustand der Tragfähigkeit
GZG	Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit
E-Modul	Elastizitätsmodul
G-Modul	Schubmodul
EI	Biegesteifigkeit
EA	Axialsteifigkeit
PEINRT	Primärenergie nicht erneuerbar
PEI	Primärenergie erneuerbar
GWP	Global Warming Potenzial (Treibhauspotenzial)
ODP	Ozonabbaupotenzial

AP	Versauerungspotenzial
EP	Überdüngungspotenzial
POCP	Sommersmogpotenzial
EE	Embodied Energy
OE	Operational Energy

Formelzeichen

W	Arbeit
N	Normalkraft
n_x, n_y	Normalspannungen
n_{xy}, n_{yx}	Schubspannungen
u	Verformung
ν	Querdehnzahl
ρ	Dichte
σ	Biegespannung
τ	Schubspannung
f_t	Zugfestigkeit
f_c	Druckfestigkeit
f_m	Biegefestigkeit
f_v	Schubfestigkeit
ϵ	Dehnung

Tabellenverzeichnis

2.1	Eigenschaften ausgewählter FGL nach Janke [Jan14]	16
2.2	Tragsicherheitsstrategien adaptiver Tragwerke nach Pawlowski [Paw06]	18
3.1	Vergleich der erforderlichen Eingaben für numerische Formfindungsmethoden nach [VB14]	31
3.2	Reißlacke und spröde Überzüge nach Heymann und Lingener [HL86]	40
3.3	Vergleich Evolutionsstrategie und genetische Algorithmen nach Amos et al. [AJK ⁺ 95]	45
4.1	Wirkungsindikatoren für Ökobilanzen nach Khouli et al. [KJZ14]	53
4.2	Umweltindikatoren verschiedener Betonsorten (Werte aus [IBU14], zusammengefasst in [HHR ⁺ 14b] und [HHR14a])	54
4.3	Global Warming Potential verschiedener Betonsorten (Werte aus [IBU14], zusammengefasst in [HHR ⁺ 14b] und [HHR14a])	54
4.4	Global Warming Potential von Baustahl (Werte aus [IBU14])	54
4.5	<i>Embodied Energy</i> verschiedener Baustoffe, nach [HJ11] und [AL11]	56
4.6	mechanische Eigenschaften ausgewählter Faserwerkstoffe, Werte nach [RC09]	57
6.1	isotrope Materialeigenschaften	89
6.2	orthotrope Materialeigenschaften GFK	90
6.3	adaptive Materialeigenschaften	91
6.4	Belastungen Schalentragwerk	92
6.5	Grenzzustände der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit bei passiven/adaptiven Strukturen	92
6.6	Faserverbundschalenstruktur — Untersuchungsmatrix	106
7.1	Anwendungsbeispiele — Überblick	113
7.2	Adaptives Schalentragwerk — Berechnungsergebnisse	118
7.3	Adaptive Hyparschalenkonstruktion — Materialparameter, Holzstäbe C24, [AG13]	122
7.4	Adaptive Hyparschalenkonstruktion — Materialparameter, Stahlseile S235, [AG13]	122
7.5	Belastungen Screenhaus.SOLAR	122
7.6	Versuchsbau — Materialparameter, Stahlbetondecke C30/37	133
7.7	Versuchsbau — Materialparameter, Stahlstützen und -seile S235	133
7.8	Belastungsannahmen	134

7.9	Parametervariation	135
-----	------------------------------	-----

1 Einführung

1.1 Freiformen und Leichtbau in der Architektur

Die Entwicklung leichter Schalentragwerke fasziniert Architekten und Tragwerksplaner seit Jahrhunderten, wenn nicht gar seit Jahrtausenden. Ochsendorf und Block verweisen in [OB14] auf die wesentlichen Aspekte der Studie historischer Schalentragwerke, da diese aufgrund der angewendeten Materialien häufig nur Druckkräfte abtragen können und somit eine Übertragung der Hooke'schen Kettenlinie im dreidimensionalen Raum darstellen und reinen Druckkräften unterliegen. Die Übertragung dieser Kenntnisse auf neue Materialien und die Erforschung weiterer Strukturformen unterliegt dem weiten Anwendungsfeld der Entwicklung leichter Schalentragwerke. Die Anwendung von Schalentragwerken ermöglicht die Erzeugung freier Formen und zum Teil auch identitätsstiftender Konstruktionen. Diese auf den ersten Blick rein ästhetischen Parameter, wobei den erzielbaren Bauteilschlankheiten besonderes Augenmerk zu schenken ist, können jedoch nur bewerkstelligt werden, wenn eine dem Kraftverlauf entsprechende Ausformulierung gegeben ist. Somit sind die Aspekte der architektonischen als auch der tragwerksplanerischen Betrachtung untrennbar miteinander verbunden. Schumacher fasst in [Sch14] diese Untrennbarkeit und sich gegenseitig befruchtende Zusammenarbeit der Architektur- als auch der Ingenieurdisziplin in Bezug auf die Entwicklung von Schalentragwerken zusammen. Hierbei verweist Schumacher darauf, dass die Architektur zu erreichende Ziele im Bereich des technisch Möglichen formuliert. Demgegenüber erweitern die Forschungsergebnisse der Ingenieurdisziplin die technischen Möglichkeiten und somit die Randbedingungen der Architektur.

Die Realisierung derartiger Strukturen bietet neben der Erzeugung der reinen Formen auch die große Chance materialsparende Bauwerke zu errichten. Vor der aktuellen Diskussion der Rohstoffknappheit und des Mangels an Ressourcen ist dies eine der wesentlichen Herausforderungen im Bauwesen.

Damit man den positiven Effekt der materialeffizienten Freiformbauweise nutzen kann, sind jedoch neben der Formgenerierung im Planungsprozess weitergehende Analyseschritte, z. B. die Anwendung von Formfindungsmethoden, durchzuführen.

1.2 Adaptivität und Faserverbundbau

Leichte flächige Tragwerke weisen neben den vorteilhaften Eigenschaften der geringen Bauteilmasse und -stärke typische Probleme des Leichtbaus auf. Hierzu zählen unter an-

derem eine hohe Schwingungsanfälligkeit, ein starkes Verformungsverhalten und Stabilitätsprobleme wie zum Beispiel das Platten- bzw. Schalenbeulen, vgl. Degischer [Deg09]. Diese Lastfälle und spezielle Phänomene werden beim Entwurf und bei der Bemessung leichter Tragwerke berücksichtigt. Zur Vermeidung dieser Probleme werden Bauteile häufig stärker ausgelegt und mehr Material angelagert. Dies wiederum reduziert gegebenenfalls die Schlankheit der Bauteile und erhöht die Masse der Konstruktion.

Faserverbundstrukturen können hinsichtlich der äußeren Form und des inneren Materialaufbaus frei geformt werden; hierbei erfolgt eine zu den auftretenden Spannungen affine Anordnung der lastabtragenden Fasern. Auf diese Weise können der Belastung entsprechend leichte Tragwerke entwickelt werden.

Die Ingenieurdisziplin der Luft- und Raumfahrt nimmt im Bereich des Leichtbaus, auch aufgrund der enormen Anforderungen hinsichtlich leichter Konstruktionen, eine Vorreiterrolle ein. Ein weiterer Grund ist darin zu sehen, dass Flugzeuge und Raumschiffe ständig veränderten, dynamischen Prozessen und veränderlichen Belastungen ausgesetzt sind. So werden in diesem Industrie- und Forschungszweig auch adaptive Methoden entwickelt und in die Praxis überführt, welche die simultane Anpassung der Struktur an die jeweilige Situation ermöglichen.

Dieses fundamentale Wissen kann auch im Bauwesen genutzt werden um architektonisch anspruchsvolle, leichte und materialsparende Gebäude zu realisieren. So können zum Beispiel adaptive Faserstränge direkt in die Materialstruktur von Faserverbundkunststoffen integriert werden.

1.3 Motivation

Vor dem Hintergrund zunehmender Rohstoffknappheit und steigenden Energiemangels werden in Zukunft optimierte Tragwerke und Bauwerke noch bedeutsamer sein. Die Fortschritte im Bereich des Leichtbaus und der Materialeinsparung werden maßgeblich durch die Technologiezweige der Luft- und Raumfahrt sowie des Maschinenbaus vorangetrieben. Dies liegt vor allem darin begründet, dass bei bewegten Bauteilen die Massenrelevanz sehr hoch ist. Hierbei werden Optimierungsmethoden zur Strukturoptimierung entwickelt und konsequent angewendet. Zu den wesentlichen Optimierungsmethoden zählen nach Ramm in [Lip07] die Formoptimierung, Topologieoptimierung, Bemessungsoptimierung und das Materialdesign. Durch die Anwendung dieser Methoden besteht die Möglichkeit, Material gezielt an Stellen anzuordnen an denen hohe Belastungen auftreten. Demgegenüber kann Material in spannungsfreien Bereichen eliminiert und auf diese Weise Material eingespart werden.

Neben der Optimierung bzw. Anpassung der Steifigkeiten von Strukturen mithilfe der Form- und Topologieoptimierung werden vor allem im Bereich der Raumfahrt und des Maschinenbaus adaptive Systeme erforscht, welche simultan auf Belastungen reagieren können. Somit besteht die Möglichkeit, eine Versteifung einer Struktur nicht durch Materialanlagerung zu erzielen, sondern durch den Einbau geeigneter aktiver Werkstoffe an genau identifizierten hochbelasteten Bereichen. Diese Techniken werden unter dem Begriff

der Adaptronik zusammengefasst. Als aktive bzw. smarte Materialien werden unter anderem Piezokeramiken, Formgedächtnislegierungen, rheologische Fluide und optische Fasern wissenschaftlich untersucht [Lag08]. Im Bauwesen ist der Einsatz adaptiver Systeme bisher kaum verbreitet. Als exemplarische Anwendungen können nach Janke et al. [JCMR05] die Erdbebenertüchtigung historischer Bauwerke und nach Weber et al. [WDN05] die Reduzierung der Schwingungsbelastung von Brücken genannt werden.

Neben der globalen Tragwerks- und Formenanalyse bzw. -optimierung kann vor allem bei Mehrkomponentenmaterialien wie z. B. faserverstärkten Kunststoffen eine interne, an den Lastfluss angepasste Materialauslegung erfolgen. Die Anpassung des Faserlayouts im Inneren von Faserverbundstrukturen wird von Doumptioti [Dou09] anhand biologischer Strukturen untersucht und für technische Anwendungen abstrahiert.

Durch die Anwendung parametrischer Systeme besteht die Möglichkeit der Simulation adaptiver Systeme, wobei die einzelnen auftretenden Zustände berechnet werden können. Es kann somit eine Vielzahl unterschiedlicher Modelle generiert und ausgewertet werden. Basierend auf diesen Ergebnissen kann die Ausrichtung der konventionellen Verstärkungsfasern und der adaptiven Faserbereiche berücksichtigt werden.

1.4 Ziel und Ansatz

Das Ziel der Arbeit besteht darin, die Anwendungsbereiche der Faserverbundwerkstoffe in der Architektur durch den Einsatz innovativer Planungsmethoden unter Einbeziehung hochmoderner Fertigungsansätze zu erweitern. Als Arbeitsgrundlage werden unter anderem optimierte Tragstrukturen in der Natur (Bionik) und der Luft- und Raumfahrt recherchiert und hinsichtlich der Überführbarkeit auf die Belange des Bauwesens geprüft. Gerade im Bereich des Faserverbundbaus können die Erkenntnisse und Evolutionsschritte der Natur genutzt werden, da viele Pflanzen aus „natürlichen Faserverbundwerkstoffen“ bestehen. Zudem weist die Natur als Vorreiter auf dem Gebiet der Formfindung große Erfahrungen auf. So wurden Bäume, Blätter und Panzer von Käfern für die jeweilige Lebens- und Belastungssituation über die Jahrtausende evolutionär angepasst. Diese Erkenntnisse bieten auch bei der Entwicklung „technischer Faserverbundstrukturen“ ein enormes Entwicklungspotenzial. Neben der Optimierung von Schalenstrukturen hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften und des Erscheinungsbildes gewinnen die Aspekte der Nachhaltigkeit zunehmend an Bedeutung. Diesem Fakt ist durch ganzheitliche Ökobilanzanalysen Rechnung zu tragen.

Die für die Planung derzeit angewendeten Computerwerkzeuge sind für ihren jeweiligen individuellen Einsatzzweck optimiert. So können mithilfe hoch entwickelter CAD-Programme vielfältige Formen, bis hin zu organischen Formen generiert werden. Auch die für die statische und dynamische Berechnung verfügbaren Finite-Elemente-Programmsysteme unterliegen einer ständigen Weiterentwicklung und ermöglichen die Berechnung unterschiedlichster Tragwerkstypen. Hierbei kann auch die Formfindung von Seil- und Schalentragwerken berücksichtigt werden. Diese einzelnen für sich spezialisierten Softwaretools

und damit verknüpften Datenbasen gilt es im Hinblick auf eine effiziente Planungskultur zu vereinen. Speziell die Optimierung der Formen von Schalentragwerken erfordert hierbei einen reibungslosen Datenaustausch. Aus diesem Grund ist bei einer ganzheitlichen Planung einer adaptiven Faserverbundstruktur der Einsatz spezieller Schnittstellen zwischen den einzelnen Softwareprodukten unumgänglich. Diese Schnittstellen gilt es zu entwickeln. Neben der reinen Datenübergabe zwischen den einzelnen Programmen ist vor allem die Einbindung parametrischer Algorithmen in den Entwurfs- und Planungsprozess von wesentlicher Bedeutung. Durch die Vielzahl der möglichen zu untersuchenden Parameter stellt dieser Ansatz einen Beitrag zur Steigerung der ökologischen und ökonomischen Effizienz von Faserverbundtragwerken dar.

Der Grundgedanke der Arbeit beruht darauf, ein qualitativ hochwertiges Modell zur rationalen Auslegung adaptiver Schalentragwerke zu entwickeln. Neben der Recherche verschiedener Methoden fließen Fragen bezüglich der Bemessung von Faserverbundschalentragwerken, Erkenntnisse zur Anwendung adaptiver Strukturen in anderen Ingenieurdisziplinen und die Möglichkeiten evolutionärer, parametrischer Strukturauslegung ein.

1.5 Aufbau der Arbeit

Der Aufbau der Arbeit wird anhand der einzelnen Kapitel kurz zusammenfassend umrissen.

Zunächst werden im zweiten Kapitel die Besonderheiten adaptiver Materialien und deren Grundlagen zusammengefasst. Des Weiteren werden Einsatzgebiete adaptiver Systeme im Bauwesen aufgezeigt; hierbei stellen adaptive Systeme aus der Natur und der Technik wesentliche Wissens- und Inspirationsquellen dar. Ebenso wird ein im Rahmen der vorliegenden Arbeit und des begleitenden Forschungsvorhabens *AFAS - Aktive Faser-Verbundwerkstoffe für Adaptive Systeme* [RGH12] eigens entwickeltes Tool zur Vorauslegung smarter Materialien für adaptive Systeme vorgestellt. Zudem werden Ansätze zur Berücksichtigung der Ausfallsicherheit adaptiver Systeme dargelegt und kritisch diskutiert.

Optimierungsverfahren sind für eine materialsparende Entwicklung von Tragwerken von wesentlicher Bedeutung. Im dritten Kapitel werden die Grundlagen zu Topologie-, Formfindungs- und Materialoptimierung dargelegt. Es werden die Grundlagen von Schalentragwerken sowohl aus formbeschreibender wie auch aus tragwerksplanerischer Sicht zusammengefasst. So werden vor allem die unterschiedlichen Bauweisen in Abhängigkeit der Hauptmaterialien beschrieben. Des Weiteren werden Ansätze zu genetischen Optimierungsverfahren zusammengefasst.

Die Ökobilanzierung von Objekten gewinnt im Rahmen zunehmender Rohstoffknappheit ständig an Bedeutung. Im vierten Kapitel werden die Grundlagen einer Lebenszyklusanalyse für Tragwerke knapp erläutert. Zudem werden die Betrachtungen auf Faserverbund-

werkstoffe und adaptive Systeme erweitert und Vorschläge für eine ganzheitliche Analyse unterbreitet.

Die parametrisierte Planungsarbeit hält mehr und mehr Einzug in den Planungsalltag. Hierbei kann eine Vielzahl unterschiedlicher Strukturvarianten generiert und untersucht werden. In Kapitel fünf werden die im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelten parametrischen Modelle für die Geometrieerzeugung, die statische Analyse, die Beleuchtungsanalyse und die Lebenszyklusanalyse vorgestellt. Diese einzelnen Modelle bauen aufeinander auf und ermöglichen eine direkte Vernetzung der Strukturen und Informationen. Abschließend wird eine zur Analyse adaptiver Tragwerke entwickelte ganzheitliche Entwurfsmethode vorgestellt.

Im sechsten Kapitel wird die Entwicklung und Berechnung adaptiver Freiformschalentragwerke beschrieben. Hierbei wird eine exemplarische Beispielstruktur eingehend erörtert, wobei die Schritte der Geometrie- und Modellerzeugung, der Materialbeschreibung, der Formulierung der Optimierungsaspekte sowie der Berechnung mitsamt Lastannahmen Anwendung finden. Im Speziellen wird auf die Optimierung dieser Schale unter Ansatz adaptiver Materialkennwerte und Nachhaltigkeitskriterien eingegangen.

Neben der Vorstellung des entwickelten parametrischen Gesamtmodells und der damit einhergehenden Optimierungsmöglichkeiten von Faserverbundschalentragwerken werden in Kapitel sieben weiterführende Beispiele aufgezeigt. Anhand dieser Beispiele ist erkennbar, dass die entwickelte Methode nicht ausschließlich auf Faserverbundstrukturen beschränkt ist.

Abschließend wird die Arbeit in Kapitel acht kurz zusammengefasst und ein Ausblick auf weiterführende Aufgabenstellungen gegeben.

Im Anhang werden die verwendete Software, die entwickelten Schnittstellen und Grundlagen der entwickelten Entwurfsmethode kurz erläutert.

2 Adaptivität und Smart Materials

Adaptivität und smarte Materialien sind in jüngerer Vergangenheit vielzitierte Begriffe und deren Anwendung hoch gesteckte Entwurfsziele in der Planung technischer Strukturen. Diese Entwicklung stellt eine logische Übertragung natürlicher Prozesse in die gebaute Umgebung dar. Alle Pflanzen und Tiere sind kontinuierlichen Veränderungen und wechselnden Randbedingungen ausgesetzt. Damit sie diesen Einwirkungen optimal gewachsen sind, ist eine kontinuierliche Anpassung notwendig. So wird beispielsweise bei Knochen infolge unterschiedlicher Belastungen und Wachstumsphasen die Materialdichte durch Anlagerungen variiert ([Deg09], S. 11). Durch diese Form der Adaption können sich natürliche Strukturen über Jahrtausende auf unterschiedliche Situationen anpassen. Demgegenüber sind die meisten bis heute gebauten Gebäude so konstruiert, dass sie allen Einwirkungen statisch und ohne Struktur Anpassung widerstehen. Zur Steigerung der Effizienz dieser Objekte ist auch hierbei die Integration adaptiver Prozesse und smarter Materialien zu diskutieren.

2.1 Adaptive Systeme

Im Bauwesen werden seit Jahrtausenden fast ausschließlich starre, unveränderliche Bauwerke realisiert. Unser Gebäudebestand muss also jeder auch noch so veränderlichen Einwirkung, wie auftretenden Erdbeben- und Starkwindereignissen widerstehen und dem Tageslauf der Sonne oder den klimatischen Unterschieden der Jahreszeiten mit einer einmal definierten Form gerecht werden. Die Erfüllung dieser Anforderung ist realisierbar; zu untersuchen gilt es, ob der dafür notwendige Energie- und Materialbedarf gerechtfertigt werden kann.

Die Ingenieurdisziplinen der Luft- und Raumfahrt als auch des Maschinenbaus setzen bei Neuentwicklungen zunehmend auf anpassbare Systeme ([Ada15], [Rap03], [Bol00]). Auf diese Weise können Raumschiffe und Flugzeuge mit sinkender Eigenmasse und gesteigertem zulässigen Transportgewicht produziert werden. Um diesem Anspruch gerecht zu werden, darf natürlich nicht auf Kosten der Sicherheit Material eingespart werden. Es werden vielmehr geeignete hochleistungsfähige Materialien und Bauteile entwickelt, welche den anstehenden Belastungen widerstehen können.

Bauwerke, welche in der Lage sind, infolge äußerer klimatischer Änderungen oder aufgrund spezieller Anforderungen in der Nutzung ihre Form oder Eigenschaften zu ändern, sind bisher nur in Form weniger ausgewählter Projekte realisiert. Hierzu können unter anderem die Dreifeld-Klappbrücke Kieler Hörn [SK99], der Venezuela-Pavillon auf der Expo Hannover

[Ide01] und der Schwingungstilger des Taipei 101 in Taiwan gezählt werden. Wüstenhagen und Heidenreich [WH15] erörtern anhand eines Fassadenelementes die Möglichkeiten der adaptiven Verschattung, vgl. Abb. 2.1. Die Fokussierung liegt auf der Anwendung naturfaserverstärkter Kunststoffe im Rahmenbereich und ETFE-Kissen.

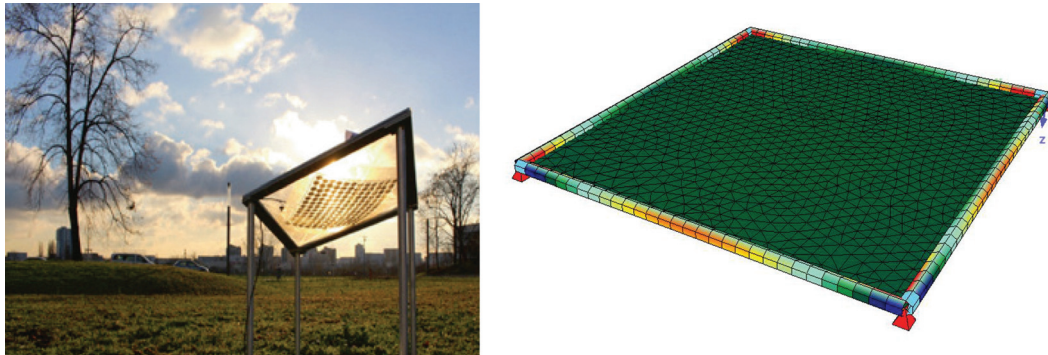


Abbildung 2.1: Adaptives Verschattungselement nach Wüstenhagen und Heidenreich [WH15]

Als weiteres Beispiel kann die wandelbare Fassade des Expo-Themenpavillons „One Ocean“ von SOMA-Architekten in Seoul genannt werden [KJSO13]. Hierbei wurde in Zusammenarbeit mit der Forschungsgruppe um Prof. Knippers der Universität Stuttgart ein bionisch inspiriertes Fassadensystem entwickelt, welches eine wandelbare Fassadenlamellensteuerung in Abhängigkeit des Sonnenstandes ermöglicht. Auf diese Weise kann eine Optimierung der Gesamtenergiebilanz erzielt werden. Nach Scheible ([KJSO13], S. 341) können des Weiteren programmierte Bewegungsabläufe als „beweglicher Blickfang für die Besucher“ inszeniert werden. Die Lamellen selber sind in Faserverbundbauweise gefertigt und weisen eine geringe Biegesteifigkeit auf. Hinsichtlich auftretender Windlasten werden sie jedoch adaptiv versteift. Hierbei „wird der weiche Rand mittels Aktuatoren gestreckt und durch die Krümmung der Fassade auf den steifen Rand der Nachbarlamelle gepresst“ ([KJSO13], S. 342). Auf diese Weise kann nach Scheible [KJSO13] die Materialbeanspruchung reduziert und die Lebensdauer erhöht werden, des Weiteren kann die notwendige Leistung für die Aktoren minimiert werden.

Ebenso präsentiert sich die Stuttgarter „SmartShell“ des Instituts für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren als ein durch Aktoren adaptiv steuerbares materialsparendes Tragwerk. Diese Holzschalenkonstruktion überspannt mit 4 cm Stärke eine Fläche von 100 Quadratmetern. Durch in der Schale integrierte Dehnmessstreifen werden Verformungen infolge Schnee und Wind registriert und eine Gegenreaktion durch die in den Fußpunkten integrierten Aktoren vollführt, vgl. [Sch12] und [Sma12]. Neuhäuser untersucht in [Neu14], wie auf Basis der Fußpunktaktivierung eine Homogenisierung der Spannungen in der Struktur erzielt werden kann. Die für die adaptive Steuerung notwendige Regelungstechnik wird von Weickgenannt [Wei13] genauer betrachtet.

Die zuvor vorgestellten adaptiven Systeme basieren auf in die Struktur integrierte Aktoren in Form mechanischer Bauteile (z. B. mechanische bzw. hydraulische Pressen). Nachfolgend werden aktuelle Konzepte strukturintegrierter adaptiver Systeme vorgestellt. Teuffel

[Teu04] erörtert anhand von Fachwerkstrukturen, inwieweit adaptive Systeme nicht als zusätzliche Systeme in den Tragwerksentwurfsprozess einfließen können, sondern vielmehr als grundlegender Bestandteil verstanden werden können. Lemaitre [Lem09] greift den Ansatz von Teuffel auf und implementiert die Schritte der Topologieoptimierung in den Entwurfsprozess adaptiver Stabwerke. Es kann gezeigt werden, dass adaptive Stabwerke hierbei ein bis zu 50 % verringertes Eigengewicht aufweisen. Pawlowski [Paw06] entwickelt ein Entwurfsverfahren für adaptive Dachtragwerke, wobei längenveränderbare Tragwerkselemente zur Optimierung der Systemverformungen bzw. Schnittgrößen zum Einsatz kommen. Weilandt [Wei08] untersucht adaptive Scheiben- bzw. Schalensysteme. Hierbei werden sowohl dehnungsaktivierte Scheiben wie auch Systeme mit adaptiven Randbedingungen analysiert.

Die Ausführungen zu Entwurfsmethoden adaptiver Tragwerke, sowohl für Stab- als auch für Flächentragwerke unter Anwendung strukturintegrierter als auch externer aktorischer Bauteile können eine Erhöhung der Tragsicherheit, Verringerung des Strukturgewichtes und Optimierung der Verformungs- und Schwingungseigenschaften nachweisen. Zudem kann festgehalten werden, dass sich die adaptive Tragwirkung aus einem passiven und einem aktivierten Anteil zusammensetzt ([Teu04], [Wei08]).

$$\text{Passiv} + \text{Aktiv} = \text{Adaptiv}$$

Die gewollte Steuerbarkeit adaptiver Systeme bedarf einer entsprechenden Sensormesstechnik. Diese erfasst die auftretenden Kennwerte (Verformungen, Schwingungen, Spannungen etc.) und ermöglicht die Ansteuerung der zuvor beschriebenen Aktoren.

Die aufgezeigten Anwendungs- und Untersuchungsfelder adaptiver Systeme beschreiben sowohl sichtbare Formänderungen über gezielte Geometriemanipulationen, z. B. bei Fassadenverschattungen, als auch nicht sichtbare Eigenschaftsveränderungen auf materieller Ebene, z. B. Längenänderung von Stabwerken bzw. Dehnungsaktivierung in Scheibenelementen. In Abb. 2.2 sind diese Ansätze prinzipiell für die Betrachtung von Fachwerkstrukturen zusammengefasst, können allerdings beliebig übertragen werden. Hierbei wird die Art der Änderung, das damit zu erreichende Ziel und das hinterlegte Konzept der Eigenschaftsänderung, beschrieben.

Aktorik	Art der Änderung	Ziel der Änderung	Konzept	Illustration
	Auflageradaption	<ul style="list-style-type: none"> • Verformungsreduzierung • Belastungsreduzierung • Schwingungsverhalten optimieren 	manuelle (mechanische) Auflagerverschiebung	
	mechanische Bauteillängenänderung	<ul style="list-style-type: none"> • Verformungsreduzierung • Belastungsreduzierung • Schwingungsverhalten und Spannungsverhalten für statische und dynamische Lasten optimieren 	mechanische Längenänderung der Bauteile (Gewindesysteme)	
	adaptive Bauteillängenänderung	<ul style="list-style-type: none"> • Verformungsreduzierung • Belastungsreduzierung • Schwingungsverhalten und Spannungsverhalten für statische und dynamische Lasten optimieren 	Längenänderung der Bauteile Änderung der Materialeigenschaften (Smart Materials)	
	Änderung der Materialeigenschaften	<ul style="list-style-type: none"> • Verformungsreduzierung • Belastungsreduzierung • Schwingungsverhalten und Spannungsverhalten für statische und dynamische Lasten optimieren 	Lastsimultane bzw. verformungssimultane Anpassung der Materialeigenschaften (Smart Materials)	
Sensorik	Art der Sensorik	Ziel der Untersuchung	Konzept	
	Ermittlung der Stäbe, welche maximalen Einfluss auf das Strukturverhalten haben	<ul style="list-style-type: none"> • optimale Sensorposition ermitteln 	Anwendung einer Sensitivitätsanalyse. Aufbringen einer Referenzlast (Einheitslast) und anschließende Strukturantwort auswerten.	
	Ermittlung der Knoten, welche maximalen Einfluss auf das Strukturverhalten haben	<ul style="list-style-type: none"> • optimale Sensorposition ermitteln 	Anwendung einer Sensitivitätsanalyse. Aufbringen einer Referenzlast (Einheitslast) und anschließende Strukturantwort auswerten.	
	Ermittlung der Auflager, welche maximalen Einfluss auf das Strukturverhalten haben	<ul style="list-style-type: none"> • optimale Sensorposition ermitteln 	Anwendung einer Sensitivitätsanalyse. Aufbringen einer Referenzlast (Einheitslast) und anschließende Strukturantwort auswerten.	

Abbildung 2.2: Aktorische und sensorische Betrachtung von Fachwerkstrukturen

2.2 Smart Materials

In Abschnitt 2.1 werden verschiedene Ansätze adaptiver Systeme auf Basis strukturiert integrierter, längen- bzw. steifigkeitsveränderlicher Materialien und Bauteile vorgestellt. Nachfolgend werden historisch bedeutsame Materialentwicklungen dargelegt. Hierbei wird deutlich, dass zunehmend Materialien verwendet werden, welche einen komplexen Aufbau aufweisen oder sehr individuellen Anforderungen gerecht werden.

2.2.1 Materialentwicklung

Die Geschichte und Entwicklung der Menschheit ist seit jeher sehr eng mit der Entwicklung und Nutzung von Materialien verbunden. Schon die Bezeichnungen der Epochen Bronzezeit, Eisenzeit und Steinzeit verdeutlichen, wie bedeutend diese Fortschritte zu werten sind. Die heutige technische Entwicklung ist nur dem stetigen Streben nach Weiterentwicklung zu verdanken. In Abbildung 2.3 ist erkennbar, dass die einzelnen Materialien über die Jahrhunderte bzw. Jahrtausende an Bedeutung entweder verloren oder aber gewonnen haben. Klassische Materialien wie glasartige oder keramische Werkstoffe weisen hierbei einen zwischenzeitlichen Rückgang in der Anwendungsrelevanz auf. Durch die technischen Keramiken gewinnt diese Materialgruppe zunehmend an Einfluss. Ein ähnliches Phänomen ist bei den Verbundwerkstoffen und Polymeren zu sehen. Hierbei werden die natürlichen Werkstoffe wie Holz, Stroh und Häute mehr und mehr vom Markt verdrängt; die Materialgruppe selber steigert durch die Einführung technischer Verbundwerkstoffe wie glasfaserverstärkte Kunststoffe und Hochtemperaturpolymere ihre Anwendungsfelder und -umfänge. Die Weiterentwicklung dieser Materialgruppe wird zu großen Teilen durch die Entwicklung leichter und energieeffizienter elektrisch betriebener Kraftfahrzeuge befördert. Hierzu werden künftig vermehrt kohlefaserverstärkte Verbundkunststoffe eingesetzt.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass Polymere, Verbundmaterialien und Keramiken den Marktanteil der Metalle reduzieren. Des Weiteren verdeutlicht Abbildung 2.3, dass nur eine stetige Materialweiterentwicklung die notwendigen Fortschritte zur Erfüllung der Aufgaben der Zukunft sicherstellen kann. Zudem ist festzustellen, dass viele Bereiche der Materialentwicklung eng mit den Ingenieurdisziplinen Luft- und Raumfahrt und dem Maschinenbau verbunden sind. Dies ist vor allem auf den Umstand zurückzuführen, dass Fahrzeuge und Raumschiffe nur bei reduziertem Eigengewicht höhere Reichweiten und höhere Traglasten bei geringerem Energieverbrauch erzielen können [Deg09].

Neben der Weiterentwicklung der konventionellen Werkstoffe werden vermehrt anpassungsfähige, adaptive Materialien erforscht. In der Fachliteratur werden für Materialien, welche ihre mechanischen bzw. geometrischen Eigenschaften in Abhängigkeit äußerer oder innerer Einwirkungen verändern können, die Bezeichnungen der *smarten*, *intelligenten*, *adaptiven*, *aktiven Materialien* bzw. *Funktionsmaterialien* verwendet. Eine einheitliche Materialbezeichnung oder genaue Abgrenzung der variablen Eigenschaften und deren Komplexität ist nach Ruth et al. [RGH12], Addington und Schodek [AS05] wie auch Teuffel [Teu04] nicht genau definiert. Dies ist vor allem darauf zurückzuführen, dass die

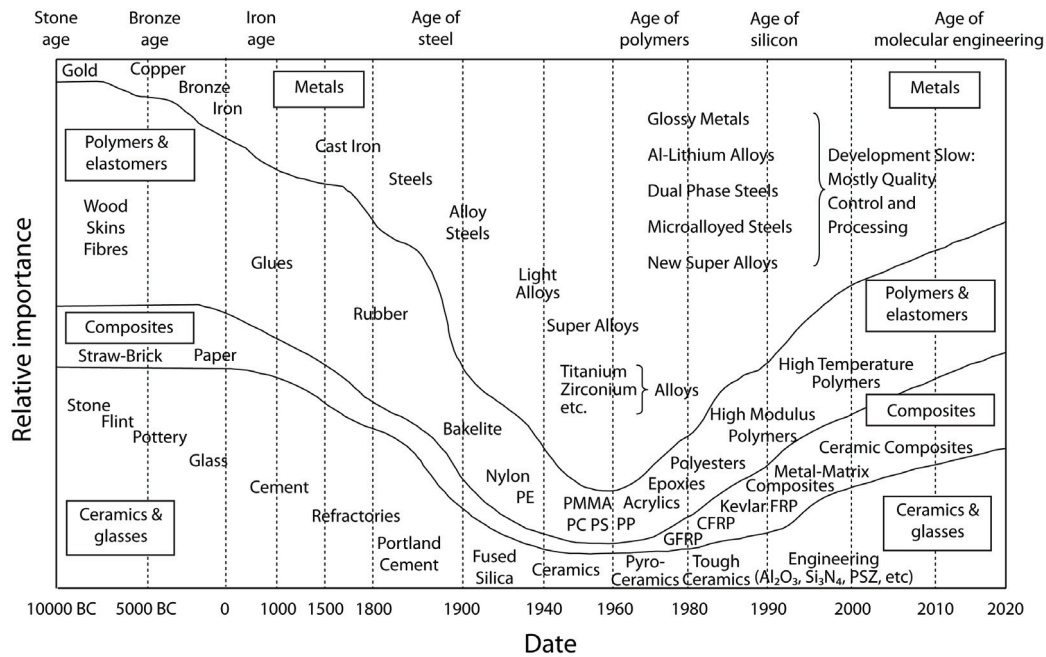


Abbildung 2.3: zeitliche Einordnung der Materialentwicklungen aus Ashby [Ash99]

Materialien häufig für den jeweiligen Einsatzzweck individuell entwickelt und die notwendigen Materialeigenschaften hierfür definiert und implementiert werden. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird der Begriff der *Smart Materials* verwendet.

2.2.2 Smart Materials im Überblick

Der Gesamtbegriff der Smart Materials vereint eine Vielzahl höchst unterschiedlicher Werkstoffe. Aufgrund der verschiedenartigen Eigenschaften lassen sich die einzelnen Materialien für vielfältige Einsatzgebiete verwenden. In Abbildung 2.4 sind für einige ausgewählte Smart Materials die mechanischen Eigenschaften wie Spannung, Dehnung und die Energiedichte zusammengefasst.

In Ruth et al. [RGH12] werden die in Abb. 2.4 dargestellten Smart Materials auf ihre Anwendbarkeit im Bereich der Luft- und Raumfahrt sowie im Maschinenbau wie auch fortführend in der Tragwerksplanung und der Architektur geprüft. Hierzu werden zum einen die einzelnen Smart Materials in Bezug auf ihre materiellen Eigenschaften, Herstellungsbedingungen und Einsatzgrenzen detailliert erörtert. Zudem werden bereits realisierte Projektbeispiele hinsichtlich der Übertragbarkeit auf weitere Anwendungsfelder geprüft. Hierbei wird deutlich, dass Smart Materials sowohl aktorische als auch sensorische Funktionen übernehmen können. Auf diese Weise können z. B. Stellwege generiert oder Schwingungs- und Verformungsmessungen durchgeführt werden. Basierend auf diesen Untersuchungen können Ruth et al. [RGH12] die für das Bauwesen realistisch einsetzbaren Smart Materials auf *piezoelektrische Keramiken*, *Formgedächtnislegierungen* und *magnetische Formgedächtnislegierungen* eingrenzen und hierzu die Abb. 2.4 in ihrem Umfang reduzieren, vgl. Abb. 2.5.

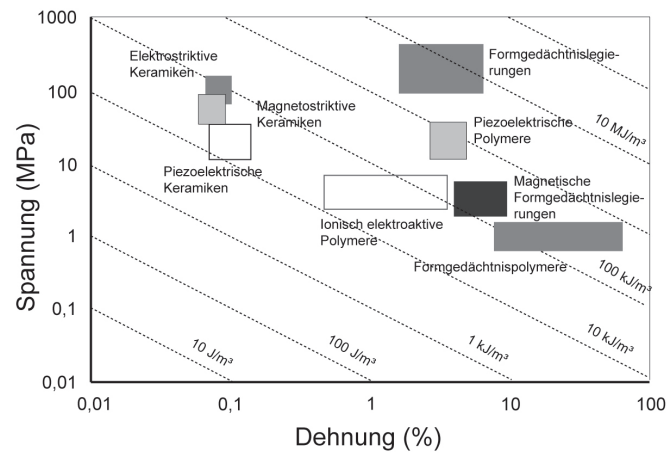


Abbildung 2.4: Spannungs-Dehnungs-Diagramm für Smart Materials nach Lagoudas [Lag08]

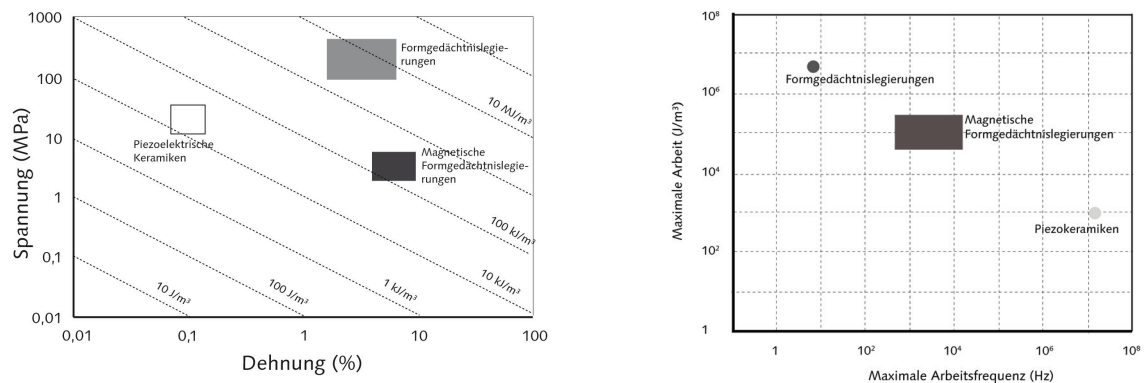


Abbildung 2.5: Smart Materials im Bauwesen — links: angepasstes Spannungs-Dehnungs-Diagramm nach Lagoudas [Lag08] aus [RGH12]; rechts: angepasstes Arbeitsfrequenz-Diagramm nach Schultz und Petry [SP04] aus [RGH12]

2.2.3 Auswahltool für Smart Materials

Ruth et al. [RGH12] haben im Hinblick auf die — trotz der in Abb. 2.5 getroffenen Reduzierung — vielfältigen Materialeigenschaften und möglichen Anwendungsgebiete von Smart Materials ein Materialauswahltool in Form eines Mockup-Projektes erstellt.

Die entwickelte prototypische Auswahlplattform unter dem Namen „SMARTchoice“ ist vornehmlich auf die Anwendung durch Praktiker, Ingenieure und Architekten zugeschnitten, damit diese für die jeweilige Planungsaufgabe geeignete Smart Materials identifizieren können. Die Materialauswahl erfolgt hierbei hinsichtlich aktorischer bzw. sensorischer Anforderungen.

Die Auswahl sensorisch geeigneter Materialien erfolgt in Bezug auf die notwendigen Eigenschaften der Druck-, Temperatur-, Verformungs- und Beschleunigungsmessung. Nach entsprechender Eingabe der Anforderungen werden mögliche einsetzbare Materialien angezeigt, vgl. Abbildung 2.6.

Einzelkriterium	Auswahl	Smart-Material
Druck	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	
Temperatur	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	
Verformung	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	
Beschleunigung	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	

Einzelkriterium	Auswahl	Smart-Material
Druck	<input checked="" type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	Piezo
Temperatur	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	
Verformung	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	
Beschleunigung	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	

zurück zur Übersicht

Abbildung 2.6: Auswahlmatrix sensorischer Wirkung [RGH12]

Die Auswahlmatrix aktorisch nutzbarer Materialien ist in Abb. 2.7 dargestellt. Diese Auswahl erfolgt hinsichtlich der notwendigen Reaktionszeit, der Eignung für den Einbau in Faserverbundwerkstoffen, der erzielbaren und notwendigen Stellwege, der Eignung für Faktoren der Erdbebensicherheit und hinsichtlich der zu erwartenden Umgebungstemperaturen. Ebenso können bauphysikalische Ansprüche die Materialauswahl beeinflussen.

Einzelkriterium	Auswahl	Smart-Material
Reaktionszeit [s] [Hz]	<input type="checkbox"/> <1 Hz <input type="checkbox"/> >1 Hz	
Eignung für Faserverbundwerkstoffe	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	
Stellweg [mm] [cm] [%]	<input type="checkbox"/> < 1 mm <input type="checkbox"/> > 1 mm	
Eignung für Erdbebensicherheit [m/s²]	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	
Art der Aktivierung [aktiv/passiv]	<input type="checkbox"/> aktiv <input type="checkbox"/> passiv	
Umgebungstemperatur [°C]	<input type="checkbox"/> 0-100°C <input type="checkbox"/> > 100°C	
Bauphysikalische Ansprüche	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	
Schalltechnische Ansprüche	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	
Verformungstechnische Ansprüche	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	

Einzelkriterium	Auswahl	Smart-Material
Reaktionszeit [s] [Hz]	<input type="checkbox"/> <1 Hz <input type="checkbox"/> >1 Hz	
Eignung für Faserverbundwerkstoffe	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	
Stellweg [mm] [cm] [%]	<input type="checkbox"/> < 1 mm <input type="checkbox"/> > 1 mm	
Eignung für Erdbebensicherheit [m/s²]	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	
Art der Aktivierung [aktiv/passiv]	<input checked="" type="checkbox"/> aktiv <input type="checkbox"/> passiv	FGL, Piezo, MSM
Umgebungstemperatur [°C]	<input type="checkbox"/> 0-100°C <input type="checkbox"/> > 100°C	
Bauphysikalische Ansprüche	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	
Schalltechnische Ansprüche	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	
Verformungstechnische Ansprüche	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	

zurück zur Übersicht

Abbildung 2.7: Auswahlmatrix aktorischer Materialien [RGH12]

Die mithilfe des Tools SMARTchoice getroffene Materialauswahl kann in einem Gesamtdiagramm hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften dargestellt werden, vgl. Abb. 2.8.

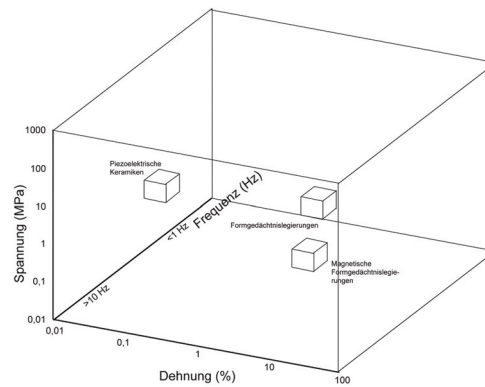


Abbildung 2.8: Eigenschaften von Smart Materials, erweiterte Grafik des Ansatzes von [Lag08] aus [RGH12]

2.2.4 Smart Materials im Bauwesen

Nachfolgend werden die von Ruth et al. [RGH12] erörterten und für das Bauwesen und die Architektur relevanten Smart Materials hinsichtlich ihrer Eigenschaften kurz beschrieben. Zudem werden ausgewählte Anwendungsbeispiele dargelegt. Weitere Informationen und Anwendungsbeispiele können Ruth et al. [RGH12] entnommen werden.

Piezokeramiken

Piezoelektrische Keramiken können sowohl für aktorische als auch sensorische Anwendungen eingesetzt werden. Diese Eigenschaft ist auf den zugrunde liegenden piezoelektrischen, als auch inversen piezoelektrischen Effekt zurückzuführen, vgl. Al-Wahab [AW04] und Ruth et al. [RGH12]. Hierbei weisen diese Materialien sehr hohe Reaktionszeiten, vgl. Janke et al. [JCMR05] und hohe abzutragende Druck- als auch Zugbelastungen [RGH12] auf. Aufgrund der sehr geringen Dehnwege, vgl. Köhnlein [Köh00], sind die Einsatzbereiche noch begrenzt, vgl. Weilandt [Wei08]. Durch die Entwicklung spezieller Bauweisen (Stapel-, Biege- und Tubusaktoren) können zunehmend größere Stellwege realisiert werden, vgl. Basche [Bas00].

Formgedächtnislegierungen

Formgedächtnislegierungen (FGL) können durch Nutzung des Formgedächtniseffektes verschiedene Zustands- oder Geometrieformen annehmen. Die Umwandlung geht mit einem Umbau der metallischen Gitterstruktur einher und basiert hierbei auf dem Einwege- oder Zweiwegeeffekt bzw. der Pseudoelastizität, vgl. Pawlowski ([Paw06], S. 24 ff.).

Der Einwegeffekt wird durch Temperaturänderung ausgelöst und ermöglicht eine einmalige nicht reversible Formumwandlung des Bauteils. Wird jedoch die Formänderung des Bauteils behindert, so entstehen mechanisch nutzbare Spannungen [RGH12].

Im Gegensatz zum nicht umkehrbaren Einwegeffekt ist der Zweiwegeeffekt durch „Über- bzw. Unterschreiten der Aktivierungs- bzw. Deaktivierungstemperatur“ ([RGH12], S. 24)

Tabelle 2.1: Eigenschaften ausgewählter FGL nach Janke [Jan14]

	Ni-Ti	Cu-Zn-Al	Cu-Al-Ni	Fe-Mn-Si-Cr	Fe-Mn-Si-Cr-Ni-VC
Elastizitätsmodul [GPa]					
Austenit	70-98	70-100	80-100		
Martensit	27	70	80	170	200
Streckgrenze [N/mm ²]					
Austenit	100-800	150-350	150-300		
Martensit	50-300	80-300	150-300	200-300	320-400
Grenzspannung [N/mm ²]					
Austenit	800-1500	400-900	500-1200		
Martensit	700-2000	700-800	1000-1200	680-1000	950
Bruchdehnung [%]					
Austenit	15-20				
Martensit	20-60	10-15	8-10	16-30	
Rückumwandlung [%]	8	3.5	2	3.4	1.6
Rückumwandlungs- spannung [N/mm ²]	600-900	400-700	300-600	200	580

aktiv wiederhol- und umkehrbar. Auf diese Weise können Bauteile zwischen zwei eingepprägten Zuständen umgeformt werden, vgl. Pawlowski [Paw06].

Neben dem aktiven Formgedächtniseffekt in Form des Zweiwegeeffektes ist bei speziellen Formgedächtnislegierungen auch der passive mechanische Effekt oder die Pseudoelastizität bekannt, „hierbei geht der Werkstoff nach einem Belastungsvorgang mit spannungsinduzierter Phasenumwandlung und damit verbundenen großen nichtlinearen Dehnungen vollständig oder teilweise in den Ursprungszustand zurück. Dabei wird eine Hysterese mit dissipativen Vorgängen durchlaufen“, vgl. Ruth et al. ([RGH12], S. 24). Janke et al. [JCMR05] und Hahnebach [Hah03] verdeutlichen die Anwendung dieses Effektes in Bezug auf die Erdbebenertüchtigung historischer Bauwerke. Die häufigsten Formgedächtnislegierungen basieren auf Nickel-Titan, Kupfer-Zink oder Eisen-Mangan-Silizium-Verbindungen. Einen umfassenden Überblick über verschiedene Arten von Formgedächtnislegierungen liefern Janke et al. [JCMR05] und Wei und Sandström [WS98]. In Tabelle 2.1 sind die wesentlichen Eigenschaften einiger FGL-Arten zusammengefasst.

Des Weiteren wird in Janke et al. [JCMR05], Ruth et al. [RGH12] und Pawlowski [Paw06] die notwendige Aktivierungszeit der Formgedächtnismaterialien kritisch diskutiert. Aufgrund dieser relativ langen Aktivierungs- und Deaktivierungszeiten sind die Anwendungen im Bauwesen, vor allem für plötzlich auftretende Lasten wie Erdbeben derzeit begrenzt. In diesen Fällen wird, wie zuvor gezeigt, häufig der passive Effekt der Formgedächtnislegierungen ausgenutzt.

Als weitere Anwendungsbereiche von Formgedächtnislegierungen im Bauwesen können vor allem Aufgabenbereiche der Vorspannung im Betonbau genannt werden. Janke [Jan14] betrachtet hierbei Betonstützen mit einer Umschnürung aus Formgedächtnislegierungen. Abdulridha et al. [APFV13], Jarno [Jar11] und Sawaguchi et al. [SKO⁺06] fokussieren ihre Untersuchungen auf die tragfähigkeitssteigernden Möglichkeiten bei der Implementierung

von Formgedächtnisbewehrungsstäben in Betonbalken, vgl. Abb. 2.9.

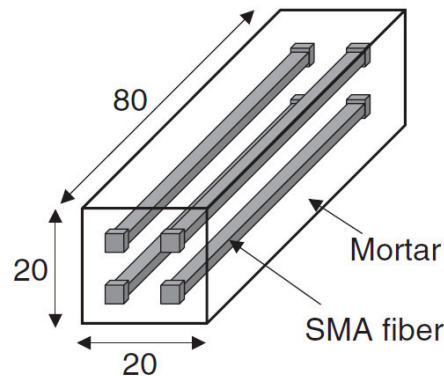


Abbildung 2.9: FGL-Stäbe als Bewehrung in Betonbalken aus Sawaguchi et al. [SKO⁺06]

Magnetische Formgedächtnislegierungen

Eine Weiterentwicklung der konventionellen FGL stellen magnetisch aktivierbare Formgedächtnislegierungen dar, welche infolge einer magnetischen Einwirkung aktiviert werden können, vgl. Schultz und Petry [SP04]. Magnetische Formgedächtnislegierungen werden aufgrund ihrer im Vergleich zu anderen Smart Materials schnellen Reaktionszeiten, der großen erzielbaren Dehnwege und hohen übertragbaren mechanischen Spannungen, vgl. Ruth et al. [RGH12], in Zukunft in vielfältiger Art und Weise zum Einsatz kommen.

2.3 Aspekte der Ausfallsicherheit

Adaptive Tragwerke können bei entsprechender Optimierung die Errichtung nachhaltiger, materialsparender und filigraner Bauwerke ermöglichen. Die dabei erzielbaren Materialeinspareffekte sind darauf zurückzuführen, dass notwendige Material- und Bauteilsteifigkeit nicht permanent passiv vorgehalten wird, sondern im Falle der Lasteinwirkung über Energie aktiviert wird, vgl. Teuffel [Teu04]. Bei dieser Betrachtungsweise werden den zu implementierenden Bauteilen, der Sensoren, Aktoren und der Steuerung, sicherheitsrelevante (z. T. tragsicherheitsrelevante) Aufgaben zugeschrieben. Nach Teuffel [Teu04] sind bei der Diskussion möglicher Ausfallszenarien neben den eigentlichen tragenden Elementen vor allem den adaptiven Elementen und der Regelung Aufmerksamkeit zu schenken. Teuffel ([Teu04], S. 39) schlägt hierbei einen reduzierten „Sicherheitsfaktor bzw. reduzierte Lastannahmen“ vor. Aufgrund der reduzierten „Wahrscheinlichkeit eines Ausfalls der Regelung bei gleichzeitiger Maximalbeanspruchung“ kann nach Teuffel ([Teu04], S. 40) ein reduzierter Sicherheitsfaktor Anwendung finden.

Pawlowski [Paw06] verdeutlicht, dass Tragsysteme auch bei Ausfall aktiver Komponenten ihre Tragsicherheit behalten müssen, wohingegen die Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit unberücksichtigt bleiben können. Pawlowski erarbeitet auf Basis der DIN

Tabelle 2.2: Tragsicherheitsstrategien adaptiver Tragwerke nach Pawlowski [Paw06]

Strategie	Beschreibung	Sicherheitsfaktoren
Strategie Nr. 1	Tragsicherheitsermittlung entsprechend nicht adaptiver Tragwerke maßgebende Schnittgrößen resultieren aus nicht adaptierten Lastfällen Gebrauchstauglichkeit maßgebend Adaption stellt zusätzliche Sicherheit dar	$\gamma_{G,sup} = 1,35$ $\gamma_{G,inf} = 1,00$ $\gamma_Q = 1,50$
Strategie Nr. 2	Tragsicherheitsermittlung entsprechend außergewöhnlicher Einwirkungskombinationen Tragwerk muss nach Versagen des Adaptionssystems aus Verformungslage (z. T. Überschreiten der Gebrauchstauglichkeitsgrenzen) gehoben werden Bemessung erfolgt anhand nicht adaptierter Momente, Quer- und Normalkräfte Wesentlicher Unterschied zur Bemessung nicht adaptiver Systeme	$\gamma_F \approx 1,1$
Strategie Nr. 3	Tragsicherheitsnachweis entsprechend Grundkombination Annahme 1: Versagenswahrscheinlichkeit der Aktoren ist sehr gering Annahme 2: Überlastung des Tragwerks im Falle des Versagens stellt keine Gefahr für Allgemeinheit dar	$\gamma_{G,sup} = 1,35$ $\gamma_{G,inf} = 1,00$ $\gamma_Q = 1,50$
Strategie Nr. 4	Tragsicherheitsermittlung entsprechend außergewöhnlicher Einwirkungskombinationen Annahme: Adaptionssysteme fallen nicht aus, Schnittgrößen werden auf definierte Werte adaptiert Zur sicheren Abtragung höherer Wind- und Schneelasten sind Aktoren mit Sicherheitsfaktoren von ca. 1,5 zu belegen	$\gamma_F = 1,0$

1055:100:2001-03 [DIN01] vier mögliche Sicherheitsbetrachtungsstrategien. In Tab. 2.2 sind diese zusammengefasst.

Vor dem Hintergrund der Abwendung von Gefahr für Leib und Leben sind trotz der möglichen Materialeinsparung durch adaptive Tragwerke geeignete Konzepte zu bedenken. So erfüllt die Betrachtungsweise der Sicherung des Grenzzustandes der Tragfähigkeit als passives System und die Ertüchtigung der Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit hinsichtlich eines adaptiven Systems alle notwendigen Sicherheitsaspekte und ermöglicht dennoch eine Reduzierung der Bauteilabmessungen.

3 Schalen im Bauwesen — Form, Tragverhalten, Bauweisen, Optimierung

Der Begriff der *Schale* ist im allgemeinen Sprachgebrauch weit verbreitet. Im Bauwesen und in der Architektur werden Flächentragwerke mit einfacher oder doppelt gekrümmter Mittelfläche als Schalentragswerke bezeichnet, wobei die Dicke rechtwinklig zur Schalenform als 'dünn' zu bezeichnen ist. Nach Williams [Wil14] ist aber keine eindeutige Definition einer zulässigen 'Dicke' gegeben. Viele der in der Architektur umgesetzten Schalenbauwerke sind von leistungsfähigen Schalentragswerken in der Natur inspiriert. So sind Muschelschalen, Diatomeen oder Eierschalen als optimierte natürliche Konstruktionen zu bezeichnen. Ausgeführte Schalentragswerke können bis weit in die Geschichte zurückverfolgt werden, wobei auch die frühen Tragswerke dieser Art große Spannweiten überwinden. So weist schon das in den Jahren 118 - 128 n. Chr. errichtete Pantheon mit einer halbkugelförmigen Dachkonstruktion eine freie Stützweite von 43,3 m auf. Eine noch größere Spannweite wird erst im Jahr 1913 bei der von einer Stahlbetonkuppel überspannten Breslauer Jahrhunderthalle realisiert. Im 20. Jahrhundert wird eine Vielzahl schalenartiger Tragswerke errichtet, wobei nicht ausschließlich mathematisch beschreibbare Formen zum Einsatz kommen. Es werden vielmehr Methoden entwickelt, leichte, materialgerechte und filigrane Bauwerke errichten zu können. Nach Harbord [Har03] bildet die geometrische Form und die Festigkeit von Schalen eine untrennbare Einheit. Wobei die optimale Festigkeit und das optimale Tragverhalten nur erreicht werden, „wenn alle Fasern in möglichst allen Querschnitten der betrachteten Konstruktion eine möglichst gleichmäßige Beanspruchung erfahren“ ([Har03], S. 5/1).

Nachfolgend werden das Tragverhalten, die Formentwicklung und mögliche Bauweisen von Schalentragswerken an ausgewählten Beispielen erläutert.

3.1 Formen von Schalentragswerken

Schalentragswerke können nach unterschiedlichen Kriterien klassifiziert werden. Ruth und Gump [RG10] unterscheiden hierbei nach der Einteilung bezüglich des Tragverhaltens, der Entstehung und der Krümmung. Es erfolgt eine Beschreibung hinsichtlich mathematisch beschreibbarer und freier Formen.

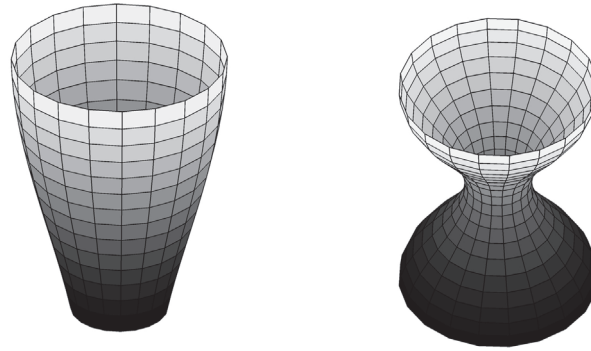


Abbildung 3.1: Schalen als Rotationsflächen — Krümmungsmaß nach Gauß (links: Buckelfläche, rechts: Sattelfläche [RG10])

3.1.1 Mathematisch beschreibbare Schalen

Die mathematisch beschreibbaren Schalenträgerwerke können nach der Art der Erzeugung und nach der Krümmung klassifiziert werden.

Die Einteilung nach der Krümmung basiert auf der charakteristischen Flächenkrümmung und wird als Gauß'sches Krümmungsmaß bezeichnet. Die Hauptkrümmungsradien R_1 und R_2 lassen sich an jedem Punkt der Schalenstruktur ermitteln [RG10].

$$K = \frac{1}{R_1 \bullet R_2} \quad (3.1)$$

In Abbildung 3.1 sind Schalengeometrien mit verschiedenen Werten des Gauß'schen Krümmungsmaßes dargestellt. Hierzu gehören die Buckelfläche und die Sattelfläche. Die Buckelflächen weisen dabei als synklastisch gekrümmte Schalen eine positive Gauß'sche Krümmung auf. Die Sattelflächen weisen eine negative Gauß'sche Krümmung auf und sind infolge der Doppelkrümmung im Gegensatz zu den Buckelflächen aus statischer Sicht als wesentlich steifer zu bewerten. Im Bauwesen sind nach Harbord ([Har03], S. 5/10) „vorrangig Rotations-, Translations- und Regelflächen von Interesse.“

3.1.2 Freie Schalen

Neben den mathematisch beschreibbaren Schalenformen sind freie Schalen vor allem für Prestigebauten von großem Interesse. Freie Schalen zeichnen sich dadurch aus, dass sie nicht geschlossen beschreibbar sind. Die Schalenform ist immer in Abhängigkeit von den Entwurfs- und Nutzungsrandbedingungen zu entwerfen und zu entwickeln. Hierbei sind verschiedene Formfindungs- und Optimierungsmethoden anzuwenden, um materialsparende Schalenbauwerke zu ermöglichen, vgl. Abschnitt 3.3.2. Schalenträgerwerke können aufgrund ihrer Schlankheit und gleichzeitig hoher Tragwirkung zu den Leichtbauobjekten



Abbildung 3.2: Kurmuschel in Sassnitz, Ulrich Müther, 1987

gezählt werden. Aus diesem Grund sind im Zuge der Tragwerksentwicklung leichtbautypische Strukturoptimierungsschritte zu vollziehen. Hierzu zählen nach Ramm, vgl. [Lip07] und Abbildung 3.7 die Topologieoptimierung, die Formoptimierung, die Bemessungsoptimierung und das Materialdesign.

3.2 Das Tragverhalten von Schalentragwerken

Schalentragwerke zählen neben den Scheiben- und Plattentragwerken zu den Flächentragwerken, vgl. Abb. 3.3. Nachfolgend soll das Tragverhalten von Schalentragwerken basierend auf den Abhandlungen des Tragverhaltens von Scheiben- und Plattentragwerken dargelegt werden.

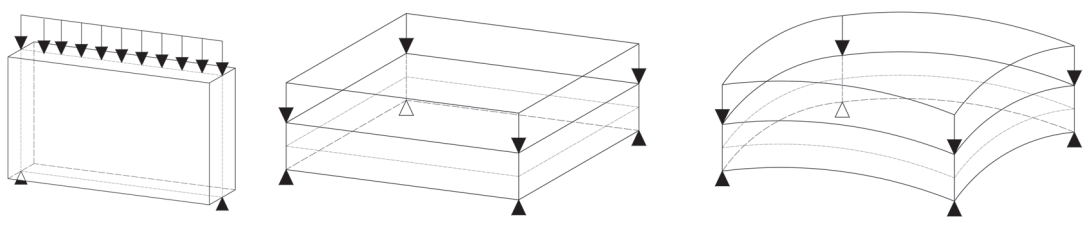


Abbildung 3.3: Flächentragwerke — von links nach rechts: Scheibentragwerk, Plattentragwerk, Schalentragwerk

3.2.1 Berechnungsgrundlagen für Scheiben- und Plattentragwerke

Scheibentragwerke sind ebene Flächentragwerke und zeichnen sich dadurch aus, dass alle Lasten parallel zur Mittelfläche angreifen und über Normalkräfte abgeleitet werden, vgl. Abb. (3.4, links). Die auftretenden Belastungen können als Membranspannungsbelastung bezeichnet werden. Hierzu zählen die Normalspannungen n_x und n_y und die Schubspannungen n_{xy} und n_{yx} .

$$\begin{aligned}\frac{\partial n_x}{\partial x} + \frac{\partial n_{yx}}{\partial y} &= q_x \\ \frac{\partial n_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial n_y}{\partial y} &= q_y\end{aligned}\tag{3.2}$$

Die o. g. Formeln können nach Williams [Wil14] in die Airy-Spannungs-Funktion ϕ überführt werden, wenn die auftretenden Lasten q_x und q_y zu Null gesetzt werden.

$$\begin{aligned}n_x &= \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} \\ n_y &= \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} \\ n_{xy} = n_{yx} &= -\frac{\partial^2 \phi}{\partial x \partial y}\end{aligned}\tag{3.3}$$

Bei Plattentragwerken hingegen wirken die Lasten senkrecht zur Mittelebene. Die angreifenden Lasten werden über die Biegetragwirkung zu den Auflagern abgeleitet, vgl. Abb. (3.4, rechts).



Abbildung 3.4: links: Scheibenbeanspruchung, rechts: Plattenbeanspruchung nach Williams [Wil14]

3.2.2 Berechnungsgrundlagen für Schalenträgerwerke

Schalen sind als ein- oder zweiachsig gekrümmte Flächentragwerke zu bezeichnen. Die auftretenden Belastungen treten senkrecht und parallel zur Mittelfläche auf. Als allgemeine Beanspruchungen sind Membran- und Querkkräfte sowie Biege- und Drillmomente zu nennen, vgl. Marti [Mar12]. Schalen werden häufig als reine Membranschalen betrachtet, wobei nur die auftretenden Membrankräfte Berücksichtigung finden und die Querkkräfte als auch die Biege- und Drillmomente vernachlässigt werden können. Diese Art der Lastableitung wird als Membranspannungszustand bezeichnet. Die vorteilhaften Eigenschaften der Ausnutzung des Membranspannungszustandes bei Tragwerken ist in den Ausführungen von Eisenbach et al. [EVG⁺14] verdeutlicht. Dieser Spannungszustand kann nur erzielt

werden, wenn nach Harbord ([Har03], S. 5/5) „keine geometrischen oder lastbedingten Zwänge auftreten“ und die „Schalenform, Ränder und Lagerung... eine konstruktive Einheit bilden.“ Des Weiteren müssen die Krümmungen der Schale stetig sein und es darf keine sprunghafte Dickenänderung der Schale geben.

Der Membranspannungszustand

Der Membranspannungszustand beruht auf der Membrantheorie. Hierbei handelt es sich um statisch bestimmte Schalenelemente, bei denen nur der Scheibenanteil berücksichtigt wird. Der Platten- bzw. Biegespannungsanteil entfällt, da die Dicke des Schalenelementes im Vergleich zur Schalenfläche sehr gering ist und die Biegesteifigkeit gegen Null geht, vgl. Abbildung 3.5. Die Membranspannungen von Schalentragwerken entsprechen im Wesentlichen nach Williams [Wil14] den Scheibenspannungen der Scheibentragwerke, vgl. Formel (3.2). Die Berechnung der Membranspannungen erfolgt anhand der Formeln (3.4). Der Lastausgleich wird über die Krümmung der Schale realisiert.

$$n_x = \bar{n}_x \frac{\cos\beta}{\cos\alpha}, \quad n_y = \bar{n}_y \frac{\cos\alpha}{\cos\beta}, \quad n_{xy} = n_{yx} = \bar{n}_{xy} = \bar{n}_{yx} \quad (3.4)$$



Abbildung 3.5: links: Schalenelement mit Hauptkrümmungsradien; rechts: Membrankräfte in Schalen beliebiger Form ([Mar12])

Das Tragverhalten flacher Schalen

Sofern bei Schalentragwerken infolge von Öffnungen, Störungen und Imperfektionen kein reiner Membranspannungszustand erreicht werden kann, sind die auftretenden Momente und Querkräfte in der Berechnung und Schalendimensionierung zu berücksichtigen. In diesem Fall, z. B. in flachen Bereichen von Schalen „ist die Membrantheorie durch die allgemeinere Biegetheorie zu ersetzen bzw. zu ergänzen“ ([Mar12], S. 600), vgl. Abb. 3.6.

Zusammenfassung und weiterführende Ansätze

Bei Schalentragwerken besteht ein enger Zusammenhang zwischen der Form und dem Tragverhalten. So sind etwaige Geometrieänderungen und deren Auswirkungen auf das Tragverhalten und die Tragwerkseffizienz in der Planungsphase sehr genau zu untersuchen. Bei

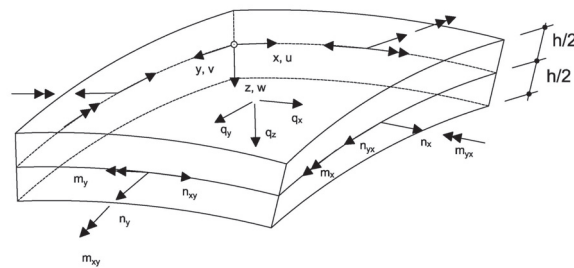


Abbildung 3.6: Darstellung eines Elementes einer flachen Schale [Mar12]

den rechnerischen Nachweisen ist im Speziellen die Stabilität zu untersuchen. Diese Imperfektionsempfindlichkeit wird von Marti ([Mar12], S. 628) auf die Vielzahl von Beulformen mit „gleichen oder fast gleichen“ Verzweigungslasten zurückgeführt. Den Verzweigungslasten misst Marti ([Mar12], S. 628) aus baupraktischer Sicht eine untergeordnete Rolle zu, da das Beulversagen schon bei „20 bis 40 % unter der kritischen Last der perfekten elastischen Schale“ eintritt. Die Grundlagen des Schalenbeulens werden bauweisenbezogen im nachfolgenden Kapitel 3.4 erläutert.

3.3 Optimierung von Schalentragswerken

Das Tragverhalten von Schalentragswerken ist in entscheidendem Maße durch die ihr zugrunde liegende Form beeinflusst. Aus diesem Grund stellt die Optimierung der Tragwerksform eine wesentliche Aufgabe bei der Bearbeitung und Planung von Schalentragswerken dar. Jedoch darf nach Harbord ([Har03], S. 5/8) die Form von Schalenbauwerken die Funktion nicht beeinträchtigen und „die Form ist zu gestalten, daß sich in Abhängigkeit von der Lagerung maximales Membrantragverhalten einstellen kann.“ Schalentragswerke können im Allgemeinen als sehr leistungsfähige Tragwerke bezeichnet werden. Die im Rahmen der Planung notwendigen Untersuchungen werden hinsichtlich des Tragverhaltens, des Verformungsverhaltens und des Schwingungsverhaltens geführt. Um eine weitere Steigerung der Effektivität und Ausnutzung weiterer Materialeinsparpotenziale zu ermöglichen, werden verschiedene Optimierungsalgorithmen genutzt. Hierzu zählen die im Abschnitt 3.5 angegebenen evolutionären Optimierungsverfahren wie auch die nachfolgend beschriebenen Verfahren der Topologie- und Formoptimierung und das Materialdesign, vgl. Abb. 3.7.

3.3.1 Topologieoptimierung

Die Methode der Topologieoptimierung wird im Konstruktionsprozess eingesetzt, um die „Topologie und die Form des Tragwerks so zu bestimmen, daß dessen mechanisches Verhalten hinsichtlich bestimmter Entwurfskriterien ein Optimum darstellt“ ([Mau98], S. 2). Zu diesen Randbedingungen zählen „die zur Verfügung stehenden Auflager, die äußeren Lasten sowie der Entwurfsraum, in dem sich das Tragwerk befinden soll“ ([Mau98], S.

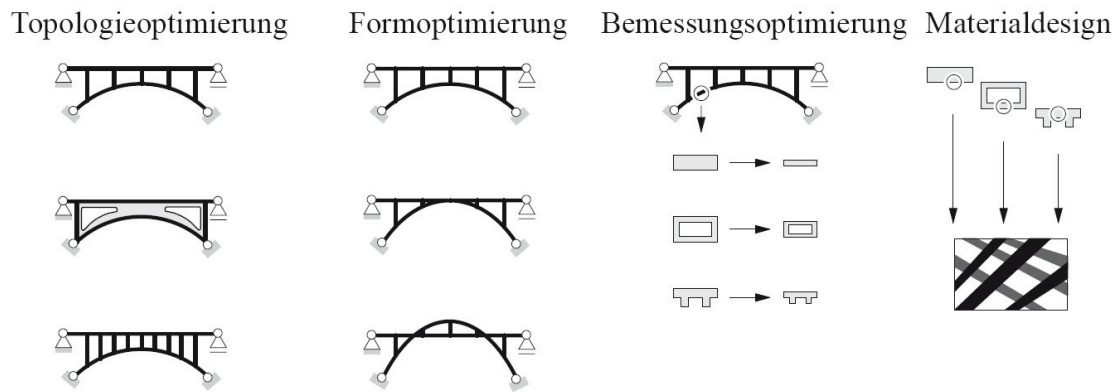


Abbildung 3.7: Strukturoptimierung nach Ramm [Lip07]

2). Auf diese Weise können nicht belastete bzw. nicht benötigte Bereiche ausgespart und beispielsweise für Öffnungen genutzt werden, vgl. Walser [Wal11] und Degischer [Deg09]. Im Bereich der Topologieoptimierung werden zwei unterschiedliche Ansätze angewendet — die geometrische wie auch die materielle Topologieoptimierung, vgl. Abbildung 3.8.

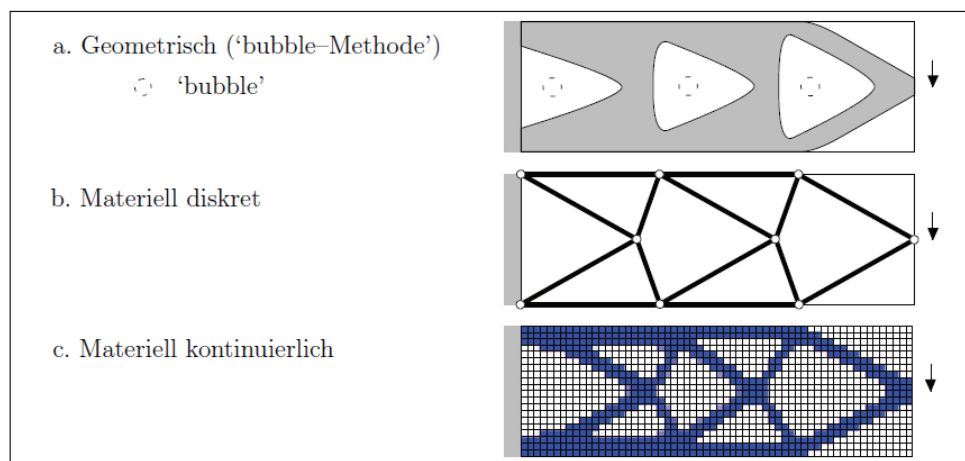


Abbildung 3.8: geometrische und materielle Topologieoptimierung [Mau98]

Die geometrische Topologieoptimierung, welche häufig als 'bubble-Methode' bezeichnet wird, basiert auf mehreren Schritten. Hierbei werden zunächst in dem zu optimierenden Tragwerk Aussparungen (Löcher) angeordnet. Die auf diese Weise veränderte Tragwerkstopologie wird im nachfolgenden Arbeitsschritt hinsichtlich der optimalen Form untersucht. Die beiden Schritte der Anordnung von Aussparungen und der anschließenden Formfindung werden so lange wiederholt, bis keine Verbesserung der Zielfunktion mehr erreicht werden kann, vgl. Maute [Mau98] und Kemmler [Kem04]. Nach Maute [Mau98] erfolgt die Geometriedefinition des Tragwerks (Form der Kanten und Oberflächen) als Lagrange-Formulierung. Diese Vorgehensweise stellt auch das „grundlegende Problem der geometrischen Topologieoptimierung“ ([Mau98], S. 48) dar.

Aufgrund der zuvor genannten Besonderheiten bei der geometrischen Topologieoptimierung wird sehr häufig auf materielle Verfahren zurückgegriffen. Die materielle Topologie-

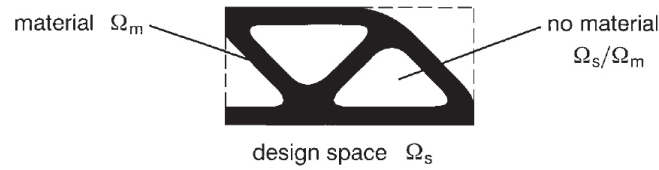


Abbildung 3.9: Materielle Topologieoptimierung [MSR98]

optimierung kann als diskreter Ansatz verstanden werden, wobei die „Grundstruktur aus endlich vielen Stab- oder Balkenelementen“ ([Lip07], S. 39-40) definiert wird. Des Weiteren kann „das Layout eines kontinuierlichen Tragwerks durch die Materialverteilung im Entwurfsraum beschrieben“ ([Lip07], S. 40) werden und somit ein kontinuierlicher Ansatz der materiellen Topologieoptimierung zum Einsatz kommen. Diese Vorgehensweise der Optimierung wird nach Maute [Mau98] als „0-1“ Materialverteilungsproblem bzw. „homogenization method“ [BS04; LAS14] bezeichnet und ermöglicht die Materialentfernung in schwach bzw. die Materialanlagerung in hoch belasteten Strukturbereichen. In Abbildung 3.9 ist der nach Maute et al. [MSR98] beschriebene Entwurfsraum Ω_s verdeutlicht. In diesem ist die optimierte Struktur als Menge Ω_m aller materialisierten („1“) bzw. unbelasteten Fehlstellen („0“) zusammengefasst, wobei jeder einzelne Bereich (Finites Element) unabhängig vom Nachbarelement definiert werden kann. Auf diese Weise kann die Topologieoptimierung auf ein Materialverteilungsproblem zurückgeführt werden.

$$\chi(X) = \begin{cases} 0 & \rightarrow \text{kein Material} \\ 1 & \rightarrow \text{Material} \end{cases} \quad \chi \in L^\infty(\Omega), [\text{Lip07}] \quad (3.5)$$

Die materielle Topologieoptimierung kann auf die Optimierung von Schalenträgwerken übertragen werden, vgl. Lochner-Aldinger und Schumacher [LAS14]. Die dabei erzeugten Oberflächen stellen sich als nicht kontinuierliche Schalen bzw. Gitterschalen dar. Zum Teil entstehen hierbei Strukturen, welche biologischen Strukturen stark ähneln, vgl. Abb. 3.10, links. Nach Lochner-Aldinger und Schumacher sind die Vorgaben der Dichteverteilung und des Materialvolumenanteils in Abhängigkeit von der gegebenen Untersuchungsaufgabe stets genau zu prüfen.

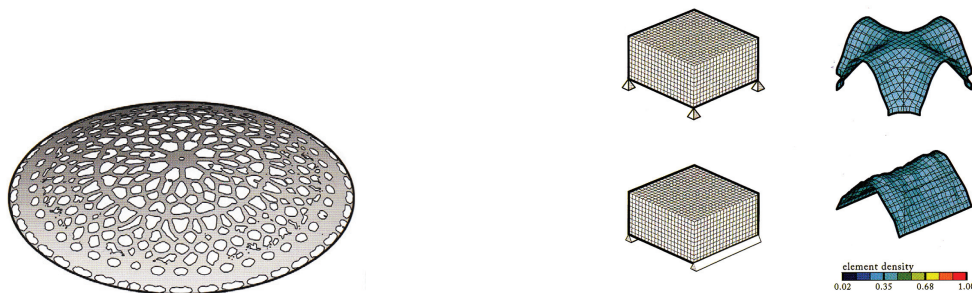


Abbildung 3.10: links: Topologieoptimierung einer gekrümmten Oberfläche mit der 'homogenization method', rechts: Topologieoptimierung einer Schalenstruktur über Volumenrestriktionen im Designraum [LAS14]

Lochner-Aldinger und Schumacher [LAS14] verdeutlichen des Weiteren die Entwicklung optimierter Oberflächentopologien von Schalentragwerken mit kontinuierlichen Oberflächen auf Basis räumlicher Designräume (Länge x Breite x Höhe), welche zudem durch die Restriktion eines zulässigen Volumenanteils definiert sind, vgl. Abb. 3.10, rechts. Lochner-Aldinger und Schumacher [LAS14] verweisen darauf, dass die Betrachtung einzelner Elemente (Pixel) im Hinblick auf die betrachteten Optimierungskriterien, z. B. die Ermittlung der maximalen Spannung in den Elementen, im Vergleich zur Integration über die gesamte Struktur zu möglichen Sprüngen in der Optimierung führt. Die Rückführung der elementbasierten Optimierung hin zu einem Integral über die Gesamtstruktur kann nach Dems [Dem91] erfolgen.

Die Ergebnisse der Topologieoptimierung, speziell der materiellen Topologieoptimierung, sind an ihren charakteristischen porösen bis rauen Oberflächen zu erkennen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass Elemente mit geringer Dichte ausgeblendet werden, vgl. Burbles et al. [BFH03]. Bei dieser Darstellungs- und Ergebnisform sind jegliche Fertigungsrandbedingungen unberücksichtigt. Damit die topologieoptimierten Modelle weitere Verwendung finden können, bedarf es einer Oberflächenbearbeitung bzw. -glättung des CAD-Modells, vgl. Abbildung 3.11. Der Rückführung der entwickelten Topologie hin zu einer CAD-Struktur ist nach Lochner-Aldinger und Schumacher [LAS14] im Hinblick auf weiterführende Untersuchungen und von der 'homogenization method' nicht zu leistende Untersuchungen wie den Stabilitätsnachweisen Beulen bzw. Knicken hohe Aufmerksamkeit zu schenken.

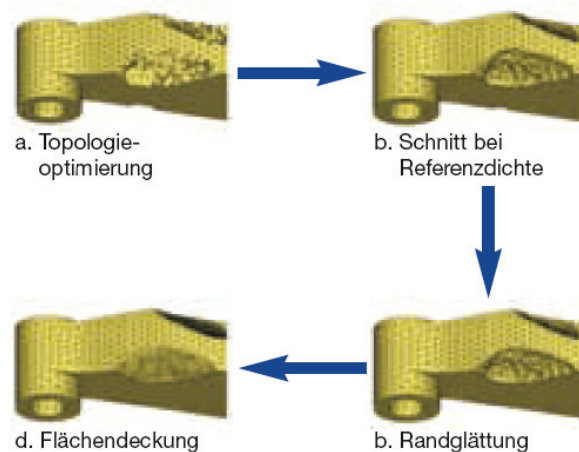


Abbildung 3.11: ergebnisbasierte Glättung — Fraunhofer IFAM [BFH03]

3.3.2 Formfindung und Formoptimierung

Formfindungsmethoden werden als experimentelle und numerische Methoden zur Generierung von Tragwerken mit statisch günstigem Tragverhalten eingesetzt. Lipka beschreibt in [Lip07] die Formoptimierung als Möglichkeit zur Optimierung der Kräfteverläufe in Bezug auf eine gleichmäßige Auslastung der Querschnitte innerhalb bestehender Topologien.

Maute ([Mau98], S. 131) formuliert den Zusammenhang zwischen Topologie- und Formoptimierung wie folgt: Der grundlegende Aufbau eines kontinuierlichen Tragwerks kann

mit der Methode der materiellen Topologieoptimierung bestimmt werden. Hierbei wird die Veränderung der Geometrie anhand der Materialverteilung in einem raumfesten Bezugssystem beschrieben. Die Methoden der Formoptimierung sind effizienter, um die Form der Kanten und Oberflächen von kontinuierlichen Tragwerken im Detail zu bestimmen. Sie beschreiben die Veränderung der Geometrie anhand der Tragwerkskonturen in einem körperfesten, konvektiven Bezugssystem. Die Topologie des Tragwerks kann dabei jedoch nicht mehr verändert werden.“

Die Methoden der Formfindung finden speziell bei der Entwicklung leichter weit spannender Membran- und Seilnetzkonstruktionen bzw. bei Schalentragwerken Anwendung. Nach Höller [Höl99] wird der Begriff der Formfindung im Zusammenhang mit der Struktur- und Gestaltoptimierung statisch und dynamisch belasteter Strukturen sehr häufig eingesetzt. Die Entwurfs- und Formfindungsergebnisse sind sehr stark von den gegebenen Randbedingungen, den eingesetzten Materialien und den angreifenden Lasten abhängig. Die Optimierung von Schalentragwerken hinsichtlich der Sicherstellung eines reinen Membranspannungszustandes wird häufig als Hauptkriterium definiert. Neben der mechanischen Betrachtungsweise verdeutlichen Bletzinger und Ramm in [BR14], dass unter Berücksichtigung der Gesetze der Wissenschaft durchaus ästhetisch anmutende Strukturen erzeugt werden können. Dieser Aspekt ist im Hinblick auf die Entwicklung architektonisch hochwertiger Tragwerke ebenso von entscheidendem Interesse.

Experimentelle Formfindungsmethoden

Experimentelle Formfindungsmethoden werden im Bauwesen seit vielen Jahrhunderten angewendet. Addis fasst in [Add14] wesentliche experimentelle bzw. physikalische Formfindungsmethoden zusammen. Hierzu gehören Hängemodelle (Gips, Wachs und Netze), Fließformen, pneumatische Formen und Seifenhautmodelle, vgl. Abbildung 3.12. Vor allem Hängemodelle, welche auf der von Bernoulli aufgestellten Theorie der Kettenlinie basieren, werden vielfach eingesetzt, um rein auf Zug beanspruchte Formen zu erzeugen. Die gefundenen Formen können bei entsprechender Versteifung als Bogenform umgekehrt werden und unterliegen anschließend reinen Druckkräften. Die auf diese Weise entstandenen sehr anschaulichen Tragwerksmodelle müssen bei der Übertragung auf den Bauwerksmaßstab einer sehr präzisen geometrischen Vermessung unterzogen werden. Nach Höller [Höl99] liefern die Messwerte (Längen, Breiten, Höhen, Winkelangaben und Zuschnitt) wichtige Informationen sowohl für die statische Berechnung als auch für die Dimensionierung einzelner Bauteile.

Numerische Formfindungsmethoden/Formoptimierung

Neben den experimentellen Formfindungsmethoden werden in der Planung immer häufiger die zeitlich jüngeren numerischen Formfindungsmethoden angewendet. Als wesentlicher



Abbildung 3.12: Minimalform als Seifenhaut

Vorteil der numerischen gegenüber den experimentellen Methoden ist die hohe Präzision der Bearbeitung und der Ergebniswerte zu nennen. Auch die Skalierung der Ergebnisse vom Modell- auf den Realmaßstab kann entfallen. Dennoch werden in aktuellen Planungsvorhaben experimentelle und numerische Formfindungsverfahren parallel eingesetzt, vgl. Walser [Wal11]. Nach Höller [Höl99] hat sich seit der Einführung der numerischen Verfahren nur die Anwendungsspezifik der experimentellen Methoden verschoben. In frühen Entwurfsphasen werden sehr häufig experimentelle Modelle und Methoden eingesetzt; so können frühzeitig prinzipielle Tragwerksformen entwickelt und hinsichtlich des Kraftflusses evaluiert werden. In den anschließenden Planungsphasen werden dagegen immer häufiger numerischen Verfahren zur Verifizierung der Ergebnisse und zur umsetzungstechnischen Ausarbeitung eingesetzt. Nach Bletzinger und Ramm [BR14] stellt die Anwendung der numerischen Formoptimierung gegenüber experimentellen Methoden eine weitaus allgemeinere Anwendungsmöglichkeit dar, da hierbei die Dicke wie auch die Materialeigenschaften simultan optimiert werden können. Beispielhaft kann dieses Vorgehen an der Entwicklung der Stützenform beim Projekt Hauptbahnhof in Stuttgart gezeigt werden. Die Form der Kelchstützen wurde von Frei Otto anhand eines Hängemodells entwickelt und im späteren Verlauf in Form einer FE-Analyse berechnet und optimiert, vgl. [Ner05] und [SSM05].

Bletzinger und Ramm definieren in [BR14] allgemeingültige Anforderungen an die Zielfunktionen für die Formfindung von Schalentragwerken:

- Festlegung der Randbedingungen und Lastfälle
- Festlegung der Materialeigenschaften
- Festlegung der Spannungs- und Verformungsgrenzen
- Erzielung eines einheitlichen Membranspannungszustandes
- Vermeidung von Beul- oder Kriecheffekten
- Erzielung einer hohen Lebensdauer
- Reduzierung der Herstellungskosten

- Erzeugung einer ästhetisch ansprechenden Form

Für die Durchführung einer numerischen Formfindung ist nach Adriaenssens et al. [ABVW14] die Formulierung der entsprechenden generellen Optimierungsaufgabe notwendig:

$$\begin{aligned} & \text{minimiere } f(x) \\ & \text{Nebenbedingung } \begin{cases} g_i(x) \geq 0, & i = 1, \dots, m \\ h_i(x) = 0, & i = 1, \dots, p \\ x_i \in x, & i = 1, \dots, n \end{cases} \end{aligned} \quad (3.6)$$

In der Literatur ist eine Vielzahl unterschiedlicher numerischer Formfindungsmethoden festgehalten [Wal11; Höl99; ABVW14]. Zu den wesentlichen zählen die Dynamische Relaxation [ABHW14], die Kraftdichtemethode (Force Density Method) [Lin14], die Flächenspannungsdichtemethode (Surface Stress Density Method), die Feder-Masse-Systeme [BVB14] als digitale Hängemodelle, die geometrisch-nichtlineare, elastostatische Analyse auf Basis der Finite-Elemente-Methode und die Deformationsmethoden in Kombination mit Optimierungsstrategien. Bletzinger und Ramm erörtern in [BR14] die Formfindung auf Basis einer numerischen Simulation mit großen Verformungen. Hierbei erfolgt die Formfindung durch das Aufbringen einer Last, z. B. der Eigenlast. Die zu berechnende Struktur nimmt dabei eine optimale Form gegenüber dieser Last ein. Diese Methode wird häufig zur numerischen Verifikation experimenteller Formfindungsansätze genutzt.

Die Kraftdichtemethode (auch: Force-Density-Method oder 'Stuttgart direct approach') wird durch Linkwitz in [Lin14] als Formfindungsmethode charakterisiert, welche auf Basis im Gleichgewicht stehender linearer Gleichungssysteme ohne Iterationen oder Konvergenzkriterien mögliche Lösungen für Kabelnetze oder vorgespannte Membrandächer erzeugen kann. Des Weiteren eignet sich diese Methode speziell für die Anwendung in frühen Leistungsphasen der Projektentwicklung. Als wesentliche auf dieser Methode basierende Bauwerke sind die Multihalle in Mannheim (1974) und die Solemar Therme in Bad Dürkheim (1987) zu erwähnen.

Im Gegensatz zur Kraftdichtemethode basiert die Dynamische Relaxationsmethode auf einer numerischen Abfolge nichtlinearer Gleichungen, wobei das Tragwerksverhalten infolge der aufgebrachten Last analysiert wird [ABHW14].

Feder-Masse-Systeme (Particle-Spring-Systems) eignen sich nach [BVB14] vor allem für die Anwendung im architektonischen Design und sind in einigen CAD-Tools zur Generierung von Hängeformen implementiert. Hierbei wird die Struktur in ein Feder-Masse-System (oder Netzwerk) übertragen, wobei die Oberfläche in Punkte und Linien unterteilt wird. Des Weiteren werden die Punkte als Knoten mit Masse und die Linien als Federn definiert. Für die Federn ist hierbei eine maximale Länge zu bestimmen. Feder-Masse-Systeme basieren auf der Ermittlung eines Gleichgewichtszustandes innerhalb des Systems. Der

Tabelle 3.1: Vergleich der erforderlichen Eingaben für numerische Formfindungsmethoden nach [VB14]

Methode	Eingabe-Wert	Formelzeichen	SI Einheit
Kraft-Dichte-Methode	Kraftdichte	q	Nm^{-1}
Dynamische Relaxation	Axialsteifigkeit	EA	$Nm^{-2}m^2 = N$
	Biegesteifigkeit	EI	$Nm^{-2}m^4 = Nm^2$
	Ausgangskoordinaten oder Länge	$L_0(x, y)$	m
	Dämpfung (viskose Dämpfung)	C	-
	Zeitschritt	Δt	s
Feder-Masse-Systeme	Federsteifigkeit	k_s	Nm^{-1}
	Ausgangskoordinaten oder Restlänge	L_0	m
	Dämpfung	k_d	-
	Zugkoeffizient	b	-
	Zeitschritt	Δt	s

Gleichgewichtszustand wird infolge einer an einem Knoten wirkenden Kraft gestört. Zum Ausgleich dieses Zustandes werden alle Federn iterativ verlängert, bis ein ausgeglichener Gesamtzustand eintritt. Die Knotenbewegungen unterliegen dabei dem zweiten Newtonschen Gesetz¹ und die Kräfte in den Federn folgen Hooke's Elastizitätsgesetz [BVB14]. Die zuvor beschriebenen Formfindungsmethoden werden von Veenendaal und Block [VB14] vergleichend gegenübergestellt, vgl. Tabelle 3.1. Sie stellen fest, dass die Möglichkeit der Anwendung der einzelnen Methoden im Wesentlichen vom Umfang der zur Verfügung stehenden Informationen abhängt. Veenendaal und Block [VB14] weisen im Besonderen darauf hin, dass entsprechend Tabelle 3.1 für die Anwendung der Kraft-Dichte-Methode die geringste Informationsdichte erforderlich ist, diese aber am schwierigsten zu steuern ist. Im Gegensatz dazu erlauben die Methoden mit höherem Eingabeaufwand, aber auch höherer Informationsdichte, bessere Ergebnisse und vor allem deren Steuerbarkeit.

¹Die Änderung der Bewegung ist der Einwirkung der bewegenden Kraft proportional und geschieht nach der Richtung derjenigen geraden Linie, nach welcher jene Kraft wirkt

3.4 Die Bauweisen von Schalentragwerken

Schalentragwerke werden unter Anwendung unterschiedlicher Materialien geplant und errichtet. Infolge der verschiedenartigen Materialeigenschaften, aber auch aufgrund differierender Herstellungsmöglichkeiten und -anforderungen sind Projekte individueller architektonischer Qualität und Ästhetik realisierbar. Nachfolgend werden Schalentragwerke in Stahl-, Holz-, Beton- und Faserverbundbauweise vorgestellt.

3.4.1 Schalentragwerke in Stahlbauweise

Schalentragwerke in Stahlbauweise werden vor allem im Bereich des Maschinen- und Anlagenbaus eingesetzt. Beispielhaft können Öltanks, Weinbehälter und Silos genannt werden. Aber auch bei nahezu allen Karosseriebauteilen von Kraftfahrzeugen wird die doppelte Krümmung zur Erhöhung der Steifigkeit bei sehr geringem Eigengewicht genutzt.

Im Bauwesen werden im Allgemeinen Stahlschalentragwerke als leistungsfähige, weit spannende Gitterschalen ausgeführt, da durch die aufzubringende Verglasung ein hoher Grad an Lichtdurchlässigkeit erzielt werden kann, vgl. Stahr [Sta09]. Die Kombination des Schalentragverhaltens mit der Gitterform ermöglicht nach Dimcic [Dim11] die Ausnutzung der axialen Lastabtragung mit geringen Biegeanteilen einer Schale bei gleichzeitiger Ausnutzung der vorteilhaften Herstellungsmöglichkeiten einer Gitterkonstruktion. Demgegenüber werden, aufgrund der hohen Anforderungen im Herstellungsprozess, vollflächig geschlossene Stahlschalenkonstruktionen im Bauwesen nur selten angewendet. Als eines der wenigen ausgeführten Beispiele sei die Dachkonstruktion der archäologischen Grabungsstätte St. Antony-Hütte in Oberhausen genannt. Diese wird im Rahmen eines Architekturwettbewerbes als verschweißte Edelstahlkonstruktion geplant. Die Ausführung erfolgt jedoch aufgrund hoher Anforderungen an die Ausführung vor Ort und möglicher Risiken in Bezug auf die Kosten als punktuell verschraubte Konstruktion, vgl. Wiesmann [Wie10]. Die Realisierung der gekrümmten Schalenform erfordert hohe technische Anforderungen an die Biegung der einzelnen Elemente.

3.4.2 Schalentragwerke in Holzbauweise

Holzschalentragwerke werden im Bauwesen aufgrund der vielfältigen Einsatz- und Bearbeitungsmöglichkeiten sehr individuell verwendet. Beispielhaft seien hier die in den 1970er Jahren errichtete Multihalle in Mannheim und das im Jahr 2010 eröffnete Centre Pompidou in Metz genannt, vgl. Menges [Men10] und Ruth et al. [RGH12]. Menges [Men10] verdeutlicht hierbei, dass die Fertigung des Centre Pompidou in den realisierten Toleranzen nicht ohne computergestützte Fertigungsmethoden umsetzbar war. Zudem lässt sich feststellen, dass aktuelle Schalenbauten im Holzbau sehr stark von vernetzten Planungsansätzen geprägt sind. So werden immer häufiger numerische Formfindungsansätze als auch computergestützte Fertigungsmethoden parallel angewendet. Die Leistungsfähigkeit



Abbildung 3.13: shells for shelter Pavillon [RHP12]

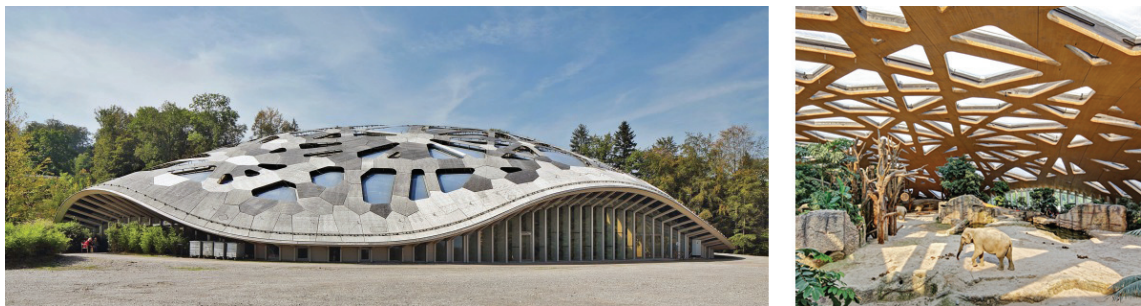


Abbildung 3.14: Elefantenhaus Zoo Zürich (Fotos: Vector Foiltec in [San14])

von Schalen in Holzbauweise wird beim 'shells for shelter'-Pavillon gezeigt, wobei Tragprinzipien der Natur hinsichtlich der Umsetzbarkeit im Bauwesen überprüft und übertragen werden, vgl. Abb. 3.13. Auch die Planung und Umsetzung des Elefantenhauses des Zoos in Zürich ist stark von der interdisziplinären Zusammenarbeit zwischen Architekten, Tragwerksplanern und Holzbauern geprägt, vgl. Abb. 3.14. Nur durch die Entwicklung geeigneter Computertools und Datenschnittstellen können hierbei die Ergebnisse der Formfindung direkt im weiteren architektonischen Planungsprozess berücksichtigt werden, vgl. Santifaller [San14].

3.4.3 Schalenträgerwerke in Betonbauweise

Schalenträgerwerke in Betonbauweise finden im Bauwesen infolge der vielfältigen Herstellungsmöglichkeiten unterschiedliche Anwendung, wobei verschiedene Bauweisen zum Einsatz kommen. Nach Zimmermann [Zim07] können diese hinsichtlich der Bezeichnungen Betonschalen, Betonrippenschalen und Betongitterschalen unterteilt werden.

Betonschalenträgerwerke zeichnen sich hierbei durch eine geschlossene Dachfläche und große zu realisierende Spannweiten aus, vgl. Abb. 3.15. Betonrippenschalen weisen demgegenüber eine höhere Sicherheit gegenüber dem Beulversagen auf, vgl. Zimmermann [Zim07]. Nach Zimmermann können die Betongitterschalenträgerwerke im Gegensatz zu Betonschalen- und



Abbildung 3.15: Brasilia - links: Nationalkongress, rechts: Nationalbibliothek

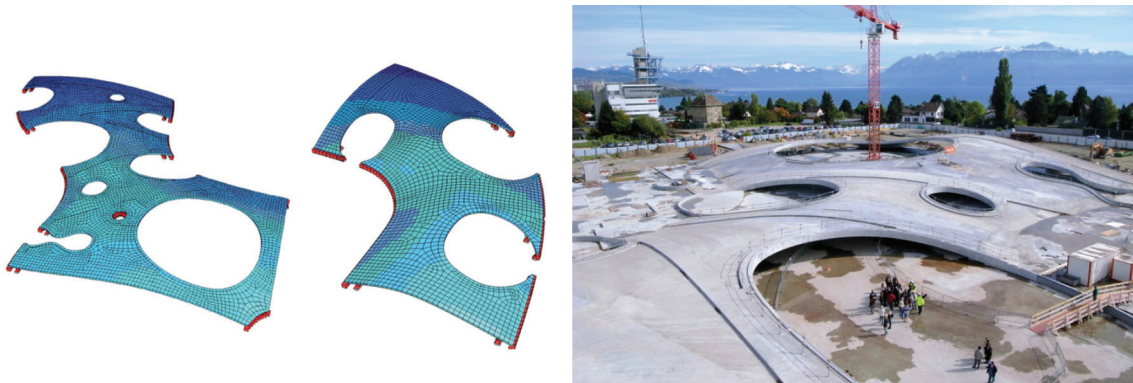


Abbildung 3.16: Rolex Learning Center in Lausanne, links: FE-Modell, rechts: während der Bauphase [BGW⁺10]

Betonrippenschalenkonstruktionen als Stabtragwerke bezeichnet werden. Hierbei sind die Stäbe nach Zimmermann [Zim07] entsprechend der gekrümmten Schalenform angeordnet.

Neben dem Einsatz regelmäßiger, mathematisch beschreibbarer Formen können im Betonschalenbau auch frei geformte Strukturen entwickelt werden. Hierbei können die Prinzipien der Formfindung angewendet und auf diese Weise materialminimierte Tragwerke und Architekturen entwickelt und umgesetzt werden, vgl. Abb. 3.16.

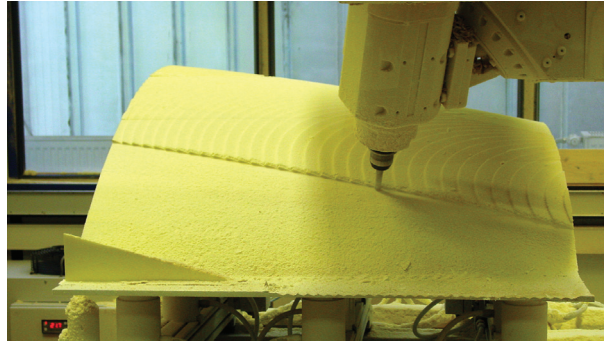


Abbildung 3.17: CNC-Fräsform für GFK-Versuchsbau MYKO, Foto: Forschungsgruppe Materialgerechtes Entwerfen und Konstruieren mit faserverstärkten Kunststoffen

3.4.4 Schalentragwerke in Faserverbundbauweise

Die erste Anwendung von Faserverbundwerkstoffen im Bauwesen findet sich bereits in den 1950er Jahren, wobei der Status der Experimentalbauten oftmals nicht überwunden wird [GV05]. Die vorteilhaften Eigenschaften von Verbundwerkstoffen hinsichtlich Korrosionsverhalten und Beständigkeit gegenüber aggressiven Medien werden vor allem im Behälterbau ausgenutzt. Als weiterer Vorteil gegenüber herkömmlichen Materialien ist das sehr gute Verhältnis zwischen Eigengewicht und Traggewicht zu nennen.

Faserverbundwerkstoffe eignen sich aufgrund ihrer freien Formbarkeit für nahezu alle Formen. Somit können ästhetische, im günstigsten Fall membrankraftbeanspruchte Tragwerke realisiert werden, wobei im Vergleich zu linearen biegebeanspruchten Bauteilen geringere Bauteilabmessungen und größere Spannweiten erreicht werden. Die Umsetzung freigeformter Faserverbundbauteile wird in konventioneller Weise unter Anwendung von Positiv- und Negativformen entwickelt. Hierbei kommt häufig ein computergesteuert erstelltes Fräsmodell zum Einsatz, vgl. Abbildung 3.17. Alternativ hierzu werden Methoden der schalungsfreien Erstellung von Faserverbundbauteilen erforscht und angewendet, vgl. Abb. 3.18, Höchst [Höc10] und Waimer et al. [WMR⁺13]. Die Reduzierung des Schalungsaufwands kann zu einer Reduzierung der Herstellungsaufwendungen und somit zur Steigerung der Akzeptanz und Marktrelevanz von Schalenbauteilen führen. Waimer et al. realisieren die Form eines Forschungspavillons, vgl. Abb. 3.18, durch die Nutzung computergesteuerter Robotersysteme, welche eine Fixierung imprägnierter Carbon- und Glasfasern im räumlichen Gefüge und mit anschließender Erhärtung ermöglichen.

Die Ausbildung von Faserverbundwerkstoffen kann nicht nur hinsichtlich der äußeren Form, sondern auch in Bezug auf die innere Materialstruktur beeinflusst werden, vgl. Doumptioti [Dou09] und Ruth et al. [RGH12]. Hierbei verweist Doumptioti auf die Möglichkeit der Abstraktion natürlicher Faserverbunde und deren Optimierung im Hinblick auf die Anwendung im Bereich technischer Materialien.



Abbildung 3.18: Forschungspavillon (links: Geometrie), schalungsfreie Faseranordnung durch Roboternutzung (rechts) [WMR⁺13]

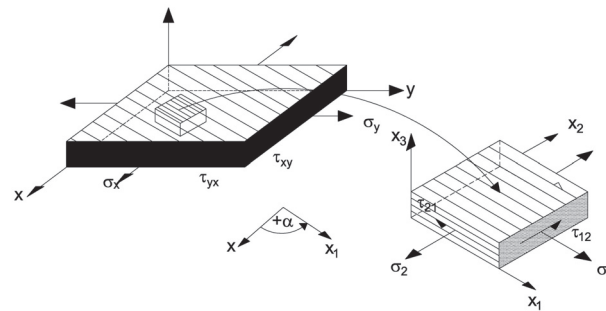


Abbildung 3.19: Koordinatensysteme einer ebenen UD-Schicht nach VDI 2014 Blatt 3 [VDI06]

Materialmodellierung und Berechnung von Faserverbundbauschalen

In Abschnitt 3.2 wird das Tragverhalten von Schalentragsystemen herausgearbeitet, wobei der Fokus auf der Beschreibung und Formulierung des Membranspannungszustandes liegt. Anhand der vorangegangenen Abschnitte wird des Weiteren verdeutlicht, dass Bauwerke aus faserverstärkten Kunststoffen neben einer freien Formbarkeit der äußeren Hülle auch auf materielle Ebene „geformt“ bzw. an die individuelle Aufgabe angepasst entwickelt werden können, vgl. Abbildungen 3.19 und 3.20. In diesen Abbildungen sind die verschiedenen anwendbaren Koordinatensysteme für die Betrachtung und Berechnung von Faserverbundstrukturen dargestellt.

Die Berechnung von Faserverbundkunststoffen kann auf Basis zweier Theorien erfolgen — der Netz- wie auch der klassischen Laminattheorie.

Die Netztheorie eignet sich für den Laminatvorentwurf in Form der Schichtenanordnung

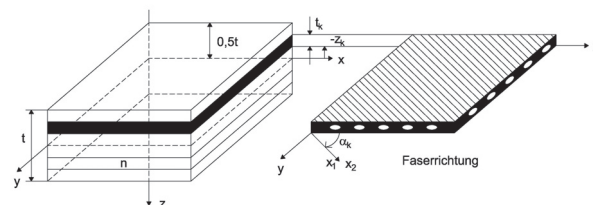


Abbildung 3.20: Laminat- und UD-Schichtdarstellung nach VDI 2014 Blatt 3 [VDI06]

und der Faserorientierung. Die Theorie basiert auf der Annahme, dass nur die Fasern die äußeren Lasten in Faserrichtung abtragen [VDI06],[MHW95]. Hierbei wird des Weiteren ein Membranspannungszustand gefordert. Die die Fasern umgebende Matrix wird nicht zur Lastabtragung herangezogen, sondern sie verhindert nur das Knicken der Fasern infolge Druckbelastung [VDI06]. Senkrecht zu den Fasern auftretende Lasten können nur von schichtenweise angeordneten und gegenseitig verdrehten Faserlagen abgetragen werden, vgl. nachfolgende Formel nach [MHW95].

$$\begin{aligned}\sigma_{1k} &= \sigma_x \cos^2 \alpha + \sigma_y \sin^2 \alpha + \tau_{xy} \sin 2\alpha \\ \sigma_{2k} &\stackrel{!}{=} 0 \\ \tau_{12k} &\stackrel{!}{=} 0\end{aligned}\tag{3.7}$$

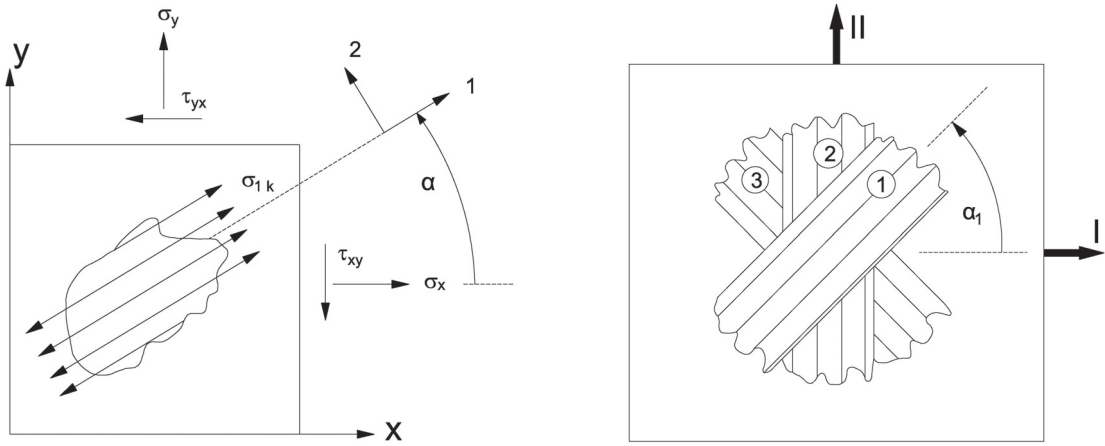


Abbildung 3.21: links: Wirkungskomponenten in Faserrichtung, rechts: 3-Schicht-Laminat [MHW90]

Die Vernachlässigung der Matrix an der Tragwirkung ist nach Michaeli et al. [MHW95] bei einer Verformungsanalyse nicht mehr möglich und es sollte auf die klassische Laminattheorie zurückgegriffen werden.

Die klassische Laminattheorie „beinhaltet die so genannte Kirchhoff’sche Plattentheorie dünner Schalen und verhilft dazu, die Spannungswerte σ_1 , σ_2 , τ_{21} und die zugehörigen Verzerrungswerte ϵ_1 , ϵ_2 , γ_{21} in jeder einzelnen Schicht des Laminates zu ermitteln“ ([VDI06], S. 57). Jedoch eignet sich diese Theorie nur für ungestörte Bereiche im Tragwerk.

Die Laminatberechnung kann unter Annahme linearer Elastizitätsgesetze mithilfe nachfolgender Formel erfolgen [VDI06].

$$\begin{Bmatrix} n^0 \\ m \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \epsilon^0 \\ \kappa \end{Bmatrix} = [K] \begin{Bmatrix} \epsilon^0 \\ \kappa \end{Bmatrix}\tag{3.8}$$

Die Matrix $[K]$ wird als Steifigkeitsmatrix des Laminates bezeichnet und umfasst die Untermatrizen $[A]$ der Scheibensteifigkeit, $[B]$ der Kopplungssteifigkeit und $[D]$ der Platten-

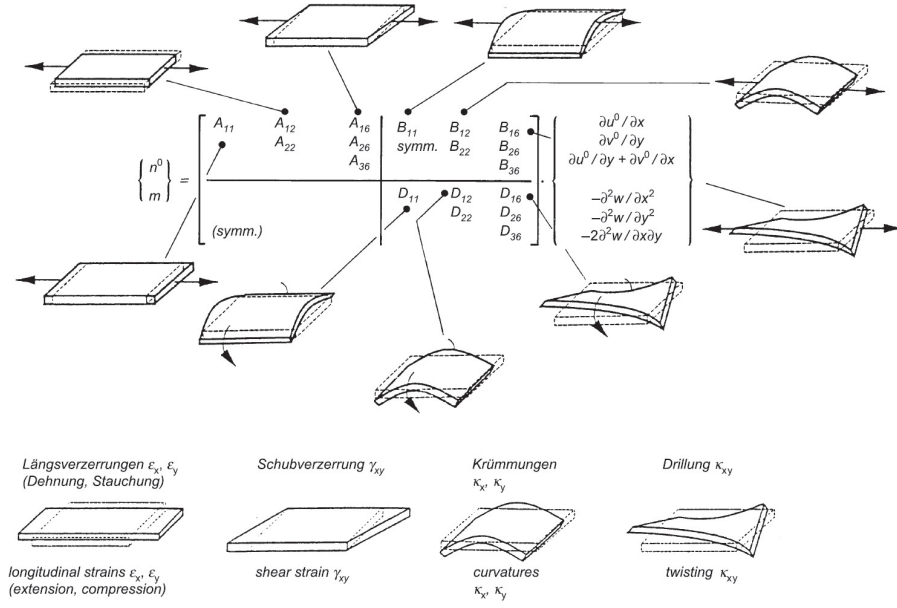


Abbildung 3.22: Laminatverformungen [VDI06]

steifigkeit [VDI06].

$$[A] = \Sigma [Q']_k (z_k - z_{k-1}) = \Sigma [Q']_k t_k \quad (3.9)$$

$$[B] = 1/2 \Sigma [Q']_k (z_k^2 - z_{k-1}^2) = \Sigma [Q']_k t_k z_{km} \quad (3.10)$$

$$[D] = 1/3 \Sigma [Q']_k (z_k^3 - z_{k-1}^3) = \Sigma [Q']_k (t_k^3/12 + t_k z_{km}^2) \quad (3.11)$$

Die inverse Darstellung der Formel (3.8) lautet wie folgt

$$\begin{Bmatrix} \epsilon^0 \\ \kappa \end{Bmatrix} = [K]^{-1} \begin{Bmatrix} n^0 \\ m \end{Bmatrix} \quad (3.12)$$

Hierbei sind $\{n^0\}$ als Schnittkraftvektor, $\{m\}$ als Schnittmomentenvektor, $\{\epsilon^0\}$ als Dehnungen und $\{\kappa\}$ als Krümmungen zu definieren [VDI06].

In Abbildung 3.22 sind mögliche Laminatverformungen und deren Zuordnung zu den Koeffizienten in der Steifigkeitsmatrix dargestellt.

Schalentragwerke können, wie zuvor gezeigt, ihre optimale Tragwirkung dann erzielen, wenn die Lasten alleinig oder zu großen Teilen über Membrankräfte abtragen. Die dabei auftretenden Druckkräfte können vor allem bei schlanken Bauteilen zu einem Versagensfall hinsichtlich Stabilität, dem Beulen, führen. Hierbei ist nach Abb. 3.23 festzustellen, dass die Beullasten mitunter viel geringer sind als die Grenzlaster des Systems. Für die Berechnung der Beullasten und Beulformen sind beispielsweise in [VDI06] vereinfachte Formeln

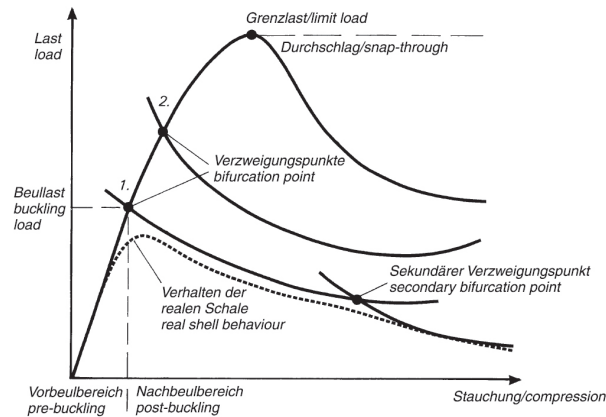


Abbildung 3.23: Beulverhalten dünnwandiger Schalen [VDI06]

idealisierten Zustände angegeben. Diese Formeln können im Rahmen der Entwurfsphase und zur Überprüfung genauerer Berechnungen herangezogen werden. Nach [VDI06] kann das Beulverhalten von FVK-Strukturen auch mithilfe von FEM-Programmen berechnet werden. ([VDI06], S. 109 ff.) unterscheidet hierbei grundlegend hinsichtlich linearer Berechnungen auf Basis der „Theorie der Gleichgewichtsverzweigung“, wobei Imperfektionen nicht direkt berücksichtigt werden können, und nichtlinearer Berechnungs- und Lösungsansätze, welche höhere Genauigkeiten bieten, aber auch lange Rechenzeiten erfordern.

Materialoptimierung hinsichtlich Hauptspannungen

Aufgrund der Anwendung der Form- und Topologieoptimierung können Faserverbundstrukturen effizient und materialsparend errichtet werden. Weitere leistungssteigernde Effekte können durch die Optimierung der Materialausnutzung und -verteilung erzielt werden. Die Materialoptimierung hinsichtlich der auftretenden Spannungen stellt ein materialübergreifend einsetzbares Entwurfswerkzeug dar. Ein sehr anschauliches Verfahren zur Materialoptimierung stellt das 1924 von Maybach entwickelte Reißlackverfahren bzw. Dehnungslinienverfahren dar, vgl. Moledenhauer [Mol11], Richter [Ric89] und Heymann und Lingener [HL86]. Bei diesem Verfahren lassen sich nach Heymann und Lingener ([HL86], S. 219) „an Originalbauteilen die Hauptspannungstrajektorien sichtbar machen und qualitative Aussagen treffen.“ Die Reißlackmethode ist ein sehr anschauliches Verfahren zur Visualisierung der Hauptspannungen, wobei neben stabförmigen auch komplexe Bauteile untersucht werden können, vgl. Abbildung 3.24. Aufgrund der notwendigen Lackrezepturen, vgl. Tabelle 3.2, und der erforderlichen Verarbeitungsbedingungen gilt es als ein messtechnisch sehr anspruchsvolles Verfahren [HL86]. Aus diesem Grund erfolgt heutzutage die Ermittlung der Hauptspannungen, des notwendigen Fasergehalts und der Faserausrichtung für komplexe Bauteilstrukturen unter Anwendung von Finite-Elemente-Modellen. Die Berechnung der Faseranordnung wird als CAIO-Verfahren (Computer Aided Internal Optimization) bezeichnet [Mol11]. Mithilfe der CAIO-Methode kann eine der Belastung angepasste Faserorientierung in Faserverbundstrukturen ermittelt werden, wobei

Tabelle 3.2: Reißlacke und spröde Überzüge nach Heymann und Lingener [HL86]

Art des spröden Überzuges	Bestandteile	Riss-empfindlichkeit $\epsilon_s \cdot 10^{-6}$	Mess-temperatur T in °C	Schicht-dicke d in mm
IFF-Lack	a) Kolophonium b) Kalziumhydroxid	300	23° bis 28°	0,3
Maybach-Lack	a) Kolophonium b) Dammarharz	200	24°	0,2 bis 0,3
Brafa-Lack	Kunstharz-komponenten	100	-10 bis +30°	0,2 bis 0,3
Emaillie	a) Borax b) Quarz	100	-10° bis +250°	0,1
Eloxalschicht	Oxalsäure	500	0° bis 30°	0,05

auch Störungen infolge Öffnungen oder Löchern berücksichtigt werden können [VDI12]. Auf diese Weise „werden die Fasern bestimmungsgemäß auf Zug bzw. Druck belastet, und der für Faserverbunde kritische Schub zwischen den Fasern wird minimiert“ ([VDI12], S. 16). In Abbildung 3.25 ist der schematische Ablauf einer CAIO-Optimierung verdeutlicht. Nach Mattheck [Mat97] können die auftretenden Schubspannungen durch Anwendung einer iterativen CAIO-Optimierung erheblich reduziert werden.

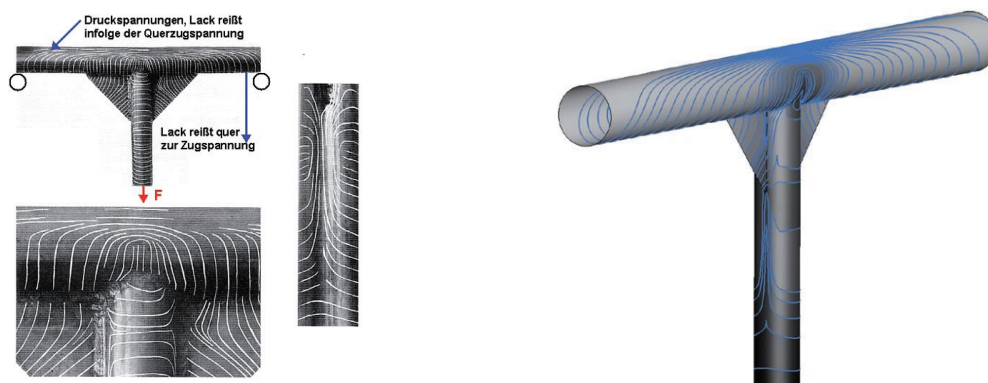


Abbildung 3.24: Rissverlauf in einem T-Rohr (links: Reißlackverfahren, rechts: CAIO-Faserverlauf) [Mol11]

Wie zuvor beschrieben hat die Faserorientierung entscheidenden Einfluss auf die Steifigkeit des Bauteils. Speziell beim Einsatz langfaserverstärkter Kunststoffe kann „die kraftfluss-gerechte Faserausrichtung durch gezieltes Ablegen der Mattenzuschnitte“ ([GW13], S. 19) realisiert werden. In Abbildung 3.26 ist der prinzipielle Zusammenhang zwischen Faserausrichtung und Steifigkeit für kurzfaserverstärkte Kunststoffe verdeutlicht. Es ist ersichtlich, dass die Steifigkeit in Abhängigkeit vom Winkel zwischen der Last und der Faserlängsachse von 100 % auf ca. 40 % absinken kann. Aber auch bei der Anwendung von Laminaten wird die faserstellungsabhängige Steifigkeitsbeeinflussung deutlich, vgl. Abbildung 3.27.

Die optimale Verlegerichtung der Fasern soll entsprechend der Hauptspannungsrichtung erfolgen. Nach Götz [Göt00] bildet die Spannungsmatrix, vgl. Formel (3.13) die Grundlage zur Ermittlung der Hauptspannung. Götz unterstellt hierbei die Gültigkeit der Elasti-

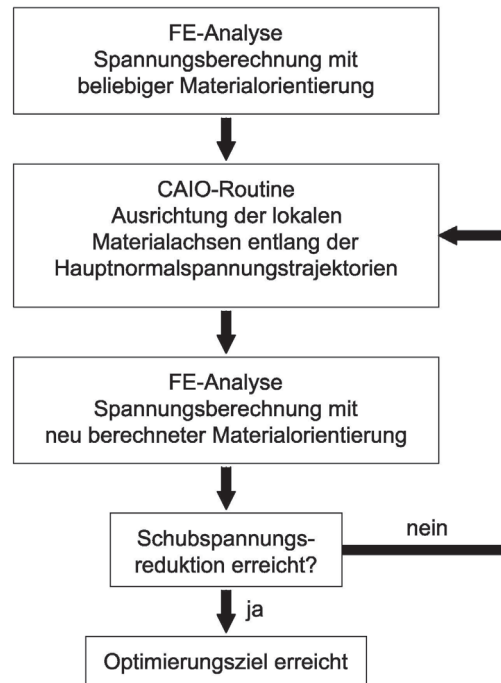


Abbildung 3.25: Schematischer Ablauf einer CAIO-Optimierung nach [VDI12]

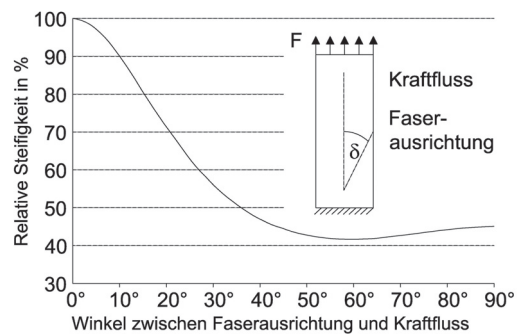


Abbildung 3.26: Zusammenhang zwischen Kurzfaserausrichtung und Steifigkeit nach Gruber und Wartzack [GW13]

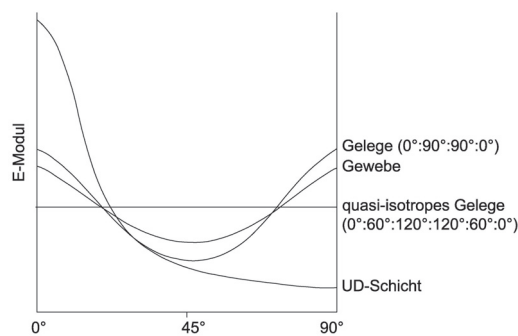


Abbildung 3.27: Zusammenhang zwischen Faserausrichtung und Steifigkeit bei Laminaten nach Michaeli und Wegener [MW90]

zitätstheorie.

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ & \sigma_y & \tau_{yz} \\ & & \sigma_z \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

Die Ermittlung der Hauptspannungstrajektorien kann unter Nutzung einer FE-Berechnung erfolgen. Hierbei werden die elementbezogenen Spannungstensoren durch Drehung der Koordinatensysteme in eine schubspannungsfreie Form überführt, siehe Abbildung 3.28. Diese ist durch drei senkrecht stehende Hauptspannungen charakterisiert. Nach Gruber und Wartzack [GW13] kann unter der Annahme eines dünnwandigen Faserverbundkunststoffbauteils die Spannung senkrecht zur Fläche vernachlässigt werden und auf diese Weise sind zwei Hauptspannungen zur Beschreibung des Spannungsproblems ausreichend. Bei der Berechnung ist dem nichtlinearen Verhalten der Form und vor allem dem Schichtenaufbau Rechnung zu tragen, vgl. Menzel und Wiedemann [MW10].

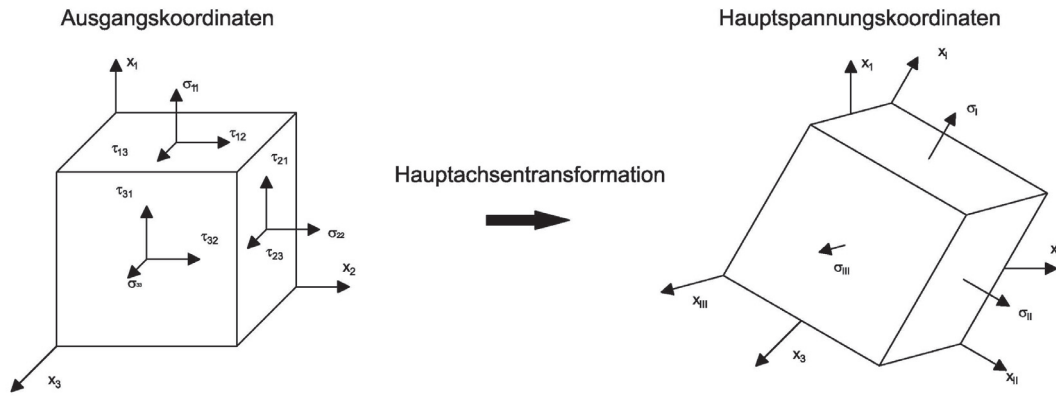


Abbildung 3.28: Hauptspannungstransformation des Spannungstensors

Die Hauptnormalspannungen bieten die Basis für die *von Mises'sche Vergleichsspannung*, welche das Fließen von elastisch-plastischen Materialien beschreibt, vgl. Götz [Göt00]:

$$\sigma_{Mises} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (3.14)$$

Die aufgezeigten Materialoptimierungsansätze eignen sich sowohl für die Auslegung von Faserverbundstrukturen als auch für die Festlegung der Bewehrungsführung in Stahlbetonkonstruktionen hinsichtlich des Kraftflusses. Nach Hörmann [Hör06] wird der Begriff *Kraftfluss* in den verschiedenen Ingenieurdisziplinen sehr unterschiedlich definiert. So ist der Kraftfluss im Maschinenbau der Kraftübertragungsweg vom Ort der Kraftherzeugung über mechanische Bauteile bis hin zum Einsatzort der Kraft [Hör06]. Im Bauingenieurwesen wird unter dem Begriff des Kraftflusses der Pfad der Kraft von der Lasteinleitungsstelle bis zum Auflager verstanden [Hör06].

3.5 Evolutionäre Optimierung im Bauwesen

In den vorangegangenen Abschnitten wurden unterschiedliche Ansätze zur Optimierung von Strukturen und Materialien aufgezeigt. Nachfolgend werden die Möglichkeiten einer evolutionären Optimierung im Bauwesen diskutiert. Evolutionäre Algorithmen stellen nach Amos et al. ([AJK⁺95], S. 14) „die neue Hoffnung auf dem Gebiet der Parameteroptimierung für ‚schwierige‘ Probleme dar.“ Sie können dort eingesetzt werden, wo „konventionelle Optimierungsverfahren ... aufgrund der Struktur der Lösungsverfahren nicht mehr effizient oder effektiv eingesetzt werden“ ([AJK⁺95], S. 14).

3.5.1 Evolutionäre Algorithmen

Der Überbegriff der evolutionären Algorithmen bzw. des *evolutionary computing* wird seit den frühen 1990er Jahren verwendet und beschreibt eine komplexe Gattung unterschiedlicher Optimierungsverfahren, welche seit den 1950er Jahren zeitgleich aber unabhängig voneinander entwickelt werden. Hierzu zählen die genetischen Algorithmen, die Evolutionsstrategie, die evolutionäre Programmierung und die genetische Programmierung. Einen zeitlichen Überblick über die Entwicklung der einzelnen Algorithmen liefert Abbildung 3.29.

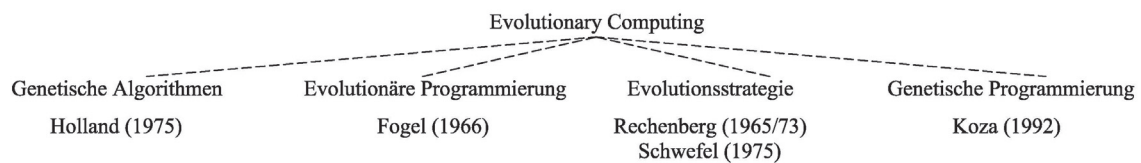


Abbildung 3.29: zeitliche Einordnung evolutionärer Algorithmen nach Weicker [Wei99]

Evolutionäre Algorithmen können als stochastische Methoden bezeichnet werden, welche biologische Evolutionsprozesse wie Adaption, Selektion und Variation nachempfinden. Nachfolgend werden die wesentlichen evolutionären Algorithmen vorgestellt.

Genetische Algorithmen

Die Entwicklung genetischer Algorithmen ist auf Holland (in [Gol89]) in den 1960er Jahren zurückzuführen. Hierbei soll der Lösungsalgorithmus so nah wie möglich an der biologischen Evolution orientiert sein und „möglichst genau evolutionäre Vorgänge auf Computersystemen“ nachahmen ([Sch03], S. 33). Dabei werden nach Coelho et al. ([CEPR14], S. 290) „... in einer zufälligen Population möglicher Lösungen die besten favorisiert und so kombiniert, dass in der nächsten Generation bessere Individuen erzeugt werden“. Die Anwendungsgebiete genetischer Algorithmen erweitern sich nach Coelho et al. [CEPR14] zunehmend. So finden diese nicht nur Anwendung bei der Ermittlung von Wettervorhersagen und von Aktienkursvorhersagen sowie bei der Erzeugung elektronischer Schaltungen

sondern auch zunehmend häufiger bei der Optimierung von Brücken und weit spannenden Konstruktionen wie Membran- und Schalenstrukturen. Aus diesem Grund wird der Problemraum in klassischen genetischen Algorithmen binär kodiert [Wei99]. Bei genetischen Algorithmen findet hauptsächlich eine zufallsgesteuerte Selektion der Elternpopulation statt, wobei die Rekombination als wesentlicher Faktor Anwendung findet [Wei07]. Hierbei kommt nach Weicker ([Wei07], S. 128) die Mutation nur als „Hintergrundoperator“ zum Einsatz, „welcher die Erreichbarkeit aller Punkte im Suchraum“ garantiert.

Evolutionsstrategie

Die Evolutionsstrategien sind auf Rechenberg und Schwefel ([Rec94], [Sch75]) zurückzuführen. Ziel war hierbei die Entwicklung eines Forschungsroboters, welcher Aufgaben im Ingenieurbereich selbstständig lösen sollte, vgl. Weicker [Wei07]. Der Problemraum wird bei dieser Strategie als reellwertiger Problemraum festgelegt. Nach Weicker ([Wei99], S. 30) werden die Eltern zufällig ausgewählt, „und der Selektionsdruck entsteht ausschließlich bei der Umweltselektion.“ Aus dieser Selektion werden nur die besten Individuen übernommen. Nach Amos et al. ([AJK⁺95], S. 23-24) werden neben der Mutation weitere „Strategieparameter“ eingesetzt, welche die Mutation beeinflussen und „ebenfalls der Evolution unterworfen sind.“ Amos et al. [AJK⁺95] stellen fest, dass somit nicht nur die Lösung optimiert wird, sondern auch der Weg der Lösungsfindung. Demgegenüber zeichnet sich die klassische Evolutionsstrategie dadurch aus, dass die Mutation als wesentliches Kriterium eingesetzt wird. Im Zuge der Weiterentwicklung der Evolutionsstrategien findet jedoch auch die Rekombination ihren Einsatz als Steuerparameter der Optimierung, vgl. Weicker [Wei99].

Evolutionäre Programmierung

Das Verfahren der evolutionären Programmierung stellt die Evolution auf einer „verhaltensbestimmten Ebene“ nach, vgl. Weicker ([Wei07], S. 139). Die Nachkommen werden nur auf ihre „phänotypisch beobachtbare Ähnlichkeit zu einem Elternteil“ untersucht ([Wei07], S. 139). Des Weiteren kann laut Weicker der Einsatz des Rekombinationsoperators entfallen.

Genetisches Programmieren

Genetische Algorithmen und genetisches Programmieren basieren im Grunde auf ähnlichen Ansätzen. So ist die Rekombination der Haupt- und die Mutation der Hintergrundoperator, vgl. Weicker [Wei07]. Der Ursprung des genetischen Programmierens besteht darin Computerprogramme evolutionär zu gestalten; häufig wird hierfür die Darstellung von Syntaxbäumen gewählt, vgl. Weicker [Wei07].

Tabelle 3.3: Vergleich Evolutionsstrategie und genetische Algorithmen nach Amos et al. [AJK⁺95]

Kriterium	Evolutionsstrategie	Genetische Algorithmen
Kodierung von Individuen	phänotypisch, reell	genotypisch, binär
Primärer Operator	Mutation	Crossover
Sekundärer Operator	Rekombination	Mutation
Selektionsstrategie	Selektion des Besten	proportionale Selektion

3.5.2 Zusammenfassung der Evolutionären Algorithmen und Unterschiede zu traditionellen Optimierungsverfahren

Von den vorgestellten Optimierungsverfahren finden im Bauwesen hauptsächlich die genetischen Algorithmen (GA) und die Evolutionsstrategie (ES) Anwendung. Im Nachfolgenden wird eine kurze Zusammenfassung und Gegenüberstellung dargelegt.

Sowohl GA wie auch ES können für vielfältige Optimierungen eingesetzt werden. Die einzige Einschränkung hierbei ist laut Amos et al. [AJK⁺95], dass die Optimierung als Parameteroptimierung erfolgen muss. Zudem muss die Kodierung für das anzuwendende Verfahren geeignet sein. In Tabelle 3.3 werden die wesentlichen Optimierungsparameter zusammengefasst. Hervorzuheben ist hierbei nochmals, dass ES und GA auf den gleichen Modellen der Evolution beruhen, diese aber unterschiedlich umsetzen. So sind die primären und sekundären Operatoren andersweitig eingesetzt und die Selektionsregeln finden unterschiedliche Anwendung. Nach Amos et al. [AJK⁺95] liegen die wesentlichen Unterschiede in der Vorgehensweise. „Während bei der ES die Mutation mit Selbstanpassung der Mutationsparameter im Vordergrund steht, ist der wichtigste Operator bei den GA der Crossover, der gute Lösungen zu noch besseren vereinigen soll, indem er die guten Eigenschaften dieser Lösungen vereinigt“, vgl. Amos et al. ([AJK⁺95], S. 36).

Aufgrund der kontinuierlichen Weiterentwicklung der einzelnen evolutionsbasierten Optimierungsverfahren und deren schrittweiser Annäherung bzw. Durchmischung können evolutionäre Algorithmen für vielfältige Optimierungsaufgaben und Problemstellungen angewendet werden, wobei keine Kenntnis über das Problem der Optimierung erforderlich ist. Zum Teil sind evolutionäre Algorithmen bei der Durchführung von Optimierungsaufgaben langsamer als konventionelle Verfahren, finden aber immer eine Lösung, welche auch ein lokales Optimum darstellen kann, vgl. Rutten [Rut13]. Die längere Berechnungszeit ist vor allem auf die Anwendung von Abbruchkriterien zurückzuführen, wobei der Berechnungsabbruch erst bei Erreichen einer gewollten gefundenen Fitness hervorgerufen wird.

Pohlheim [Poh99] weist auf grundlegende Unterschiede zwischen evolutionären und traditionellen Optimierungsverfahren hin. Hierzu gehört unter anderem, dass bei evolutionären Algorithmen eine parallele Suche von mehreren Punkten aus erfolgt, keine Ableitung der Zielfunktion erforderlich ist, eine Vielzahl von Lösungsmöglichkeiten angeboten wird, die endgültige Festlegung des „Optimums“ durch den Nutzer zu erfolgen hat und eine uni-

verselle Anwendung durch die alleinige Festlegung der Zielfunktion keine weiteren Einschränkungen vorgibt, vgl. Pohlheim [Poh99].

Nach Weicker ([Wei99], S. 33) wird vor allem bei Optimierungen von industriellen Produkten die Anwendung mehrerer „Zielattribute“ notwendig, welche zum Teil entgegengesetzte Lösungen favorisieren. Diese Art der Optimierung wird als Mehrzieloptimierung bezeichnet. Eine sinnvolle Lösung kann häufig nur bei „gutmütigen Problemen“ gefunden werden, vgl. Weicker ([Wei99], S. 33).

Anhand der zuvor zusammengefassten Eigenschaften evolutionärer Algorithmen können nach Pohlheim [Poh99] vor allem stark nichtlineare, diskontinuierliche und multimodale Einsatzgebiete und Zielfunktionen aufgezeigt werden. Demgegenüber sollten evolutionäre Algorithmen dann keine Anwendung finden, wenn „ein spezielles Lösungsverfahren für das Problem bekannt ist“ und „die Berechnung der Zielfunktion aufwendig ist“ ([Poh99], S. 12), da ein problemspezifischer Ansatz in Bezug auf die Lösungsfindung weniger Zeit in Anspruch nimmt.

Ergänzende Informationen sind unter anderem Tuan [Tua08], Rutten [Rut13] und Dimic [Dim11] zu entnehmen.

3.5.3 Ablauf einer evolutionären Optimierung

Anhand der vorherigen Abschnitte kann gezeigt werden, dass evolutionäre Algorithmen und deren Untervarianten das gemeinsame Ziel haben, die biologischen Evolutionsprozesse in Form von numerischen und stochastischen Methoden nachzubilden. Es kann gezeigt werden, dass die einzelnen Prozesse (Selektion, Rekombination und Mutation) in unterschiedlicher Wichtung Anwendung finden. In Abbildung 3.30 ist der prinzipielle Ablauf eines evolutionären Algorithmus dargestellt. Nachfolgend sollen die darin verankerten Prozesse kurz erläutert werden.

Die Initialisierung ist in evolutionären Algorithmen der erste Schritt. Hierbei wird die Ausgangspopulation erzeugt, wobei die einzelnen Individuen häufig zufällig ausgewählt werden, vgl. Pohlheim [Poh99]. Die Population stellt hierbei eine Vielzahl möglicher Lösungen des Optimierungsalgorithmus dar. Im Anschluss an die Generierung der Anfangspopulation wird diese mit der in der Optimierung verankerten Zielfunktion verglichen. Sofern die Zielvorgabe mit den implementierten Abbruchkriterien nicht erfüllt wurde, wird eine neue Population erstellt. Auf diese Weise erfolgt die Optimierung in einem evolutionären Kreislauf, vgl. Pohlheim [Poh99]. Bei der Bewertung wird jedem generierten Individuum der Population in Bezug auf das Zielkriterium und alle anderen Individuen ein Fitnesswert zugewiesen. Die Definition der Zielfunktion leistet neben der abstrakten Definition der potenziellen Lösungen einen wesentlichen Beitrag in Bezug auf die Durchführung des Optimierungsvorganges und somit zur Ermittlung der Leistungsfähigkeit der Lösungen und Strukturen [CEPR14]. Diese Prozedur stellt die Grundlage für die Auswahl der neuen Elternpopulation zur Generierung der Nachkommen dar. Dieser Vorgang wird als Selektion bezeichnet. Unter Anwendung der Rekombination werden die Nachkommen erstellt, wobei

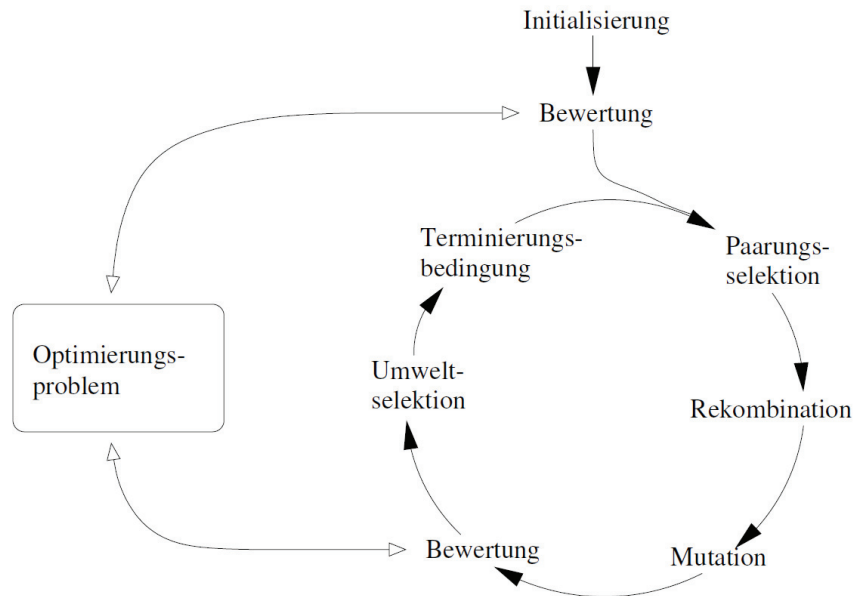


Abbildung 3.30: Ablauf einer Optimierung mit evolutionären Algorithmen, [Wei99]

die „Informationen der Eltern miteinander kombiniert“ werden, vgl. Pohlheim ([Poh99], S. 14). In Pohlheim [Poh99] sind verschiedene Rekombinationsverfahren dargelegt, welche in Abhängigkeit der Repräsentation und des Einsatzzweckes angewendet werden können. Die erzeugten Nachkommen werden durch Mutation verändert, wobei „die Variablen der Nachkommen durch kleine Störungen“ manipuliert werden, vgl. Pohlheim ([Poh99], S. 15). Im Anschluss erfolgt erneut die Bewertung der Individuen der Population gegenüber den Ziel- und Abbruchkriterien. Sofern diese noch nicht erreicht sind, wird der evolutionäre Prozess fortgesetzt. Dabei ersetzen die neu gebildeten Individuen die Ausgangsindividuen der Elternpopulation.

Sofern im Rahmen einer Optimierung mehr als ein Zielkriterium Betrachtung finden soll, sind solche evolutionären Algorithmen notwendig, welche multikriterielle Ansätze unterstützen. Die Betrachtung unterschiedlicher Zielfunktionen führt zu unterschiedlichen 'optimalen' Lösungen. Somit ist festzustellen, dass die erzeugten Lösungen nicht für alle Varianten 'optimal' sein können. Das Ergebnis der Optimierung stellt keine Einzellösung dar, sondern umschreibt einen Lösungsraum. Nach Coelho et al. ([CEPR14], S. 293) wird diese Lösungsmenge als „'trade-off set', 'Pareto front' oder 'non-dominated set'“ bezeichnet. Die Anwendung genetischer Algorithmen kann auch hinsichtlich multipler Optimierungskriterien erweitert werden. Hierzu sind die einzelnen Operatoren der genetischen Algorithmen anzupassen.

Die Auswertung multikriterieller Optimierungsvorgänge kann auf Basis der zuvor erwähnten Pareto-Front durchgeführt werden. Die Bezeichnung der Pareto-Front geht auf den Ökonomen Vilfredo Pareto zurück. Bei Pareto-Optimierungen ist es nicht möglich einen Parameter zu verbessern ohne gleichzeitig andere Parameter zu verschlechtern. Der Ort des bestbewerteten Optimums als Abwägung zwischen den verschiedenen Kriterien kann an

der Stelle der stärksten Krümmung in der Pareto-Front ermittelt werden. In Abb. 3.31 ist eine typische Pareto-Front dargestellt. Die einzelnen Entwurfsvarianten können als 'Paretooptimal' bezeichnet werden, wenn sie in Bezug auf alle anderen Lösungen zumindest hinsichtlich eines Optimierungskriteriums besser abschneiden, vgl. Winslow [Win14]. So ist die Variante C in Abb. 3.31 in Bezug auf das Optimierungskriterium F_1 und F_2 als optimal zu bezeichnen. Allerdings kann es in einzelnen Fällen günstiger sein, die Abwägung hinsichtlich eines Optimierungskriteriums (F_1 bzw. F_2) höher zu werten. Somit wird die Variante B bzw. A als Optimum bezeichnet. Allerdings kann sich auch eine Lösung zwischen diesen genannten 'Optima' befinden und für den jeweiligen Einsatzzweck am besten abschneiden. Es ist dementsprechend festzuhalten, dass die Festlegung des Variantenoptimums nicht automatisch vom Algorithmus festgelegt werden kann und somit den Bearbeitern eine umfängliche Variantenauswahl ermöglicht.

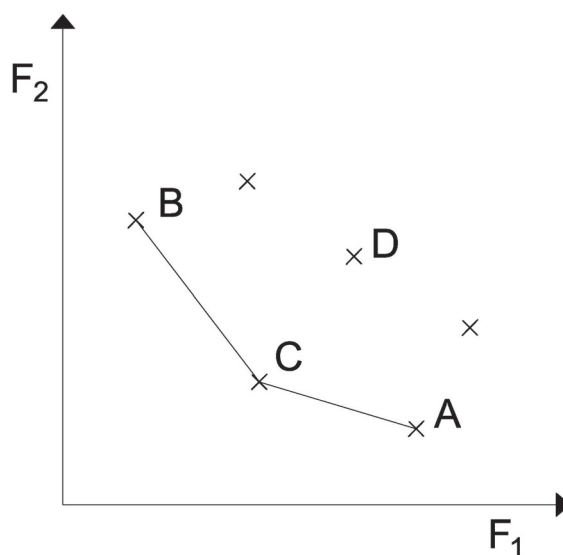


Abbildung 3.31: Abstrakte Darstellung einer Pareto-Front für einen Entwurfsraum mit zwei Zielkriterien nach Winslow [Win14]

Aufgrund der zuvor beschriebenen Charakteristik multikriterieller Optimierungen erscheint es sinnvoll, sofern möglich, die Optimierungsaufgabe auf eine einkriterielle Betrachtungsweise zurückzuführen. Dies kann durch die Einführung von Nebenbedingungen und Straffunktionen erreicht werden. Hierbei werden Varianten, welche die Nebenbedingungen nicht erfüllen, mit überhöhten Faktoren belegt und finden somit in der weitergehenden Optimierung keine Berücksichtigung und werden eliminiert. Auf diese Weise strebt die Optimierung einer kontinuierlichen Verbesserung und somit einem eindeutigen Optimierungsergebnis entgegen. Ein typischer Optimierungsgraph einer einkriteriellen evolutionären Optimierung ist in Abb. 3.32 dargestellt.

3.5.4 Weitere Optimierungsverfahren

Neben den beschriebenen und an die Biologie angelehnten Optimierungsverfahren gibt es im Bereich der „naturanaloge Verfahren“ ([AJK⁺95], S. 16) auch physikalische bzw. chemi-

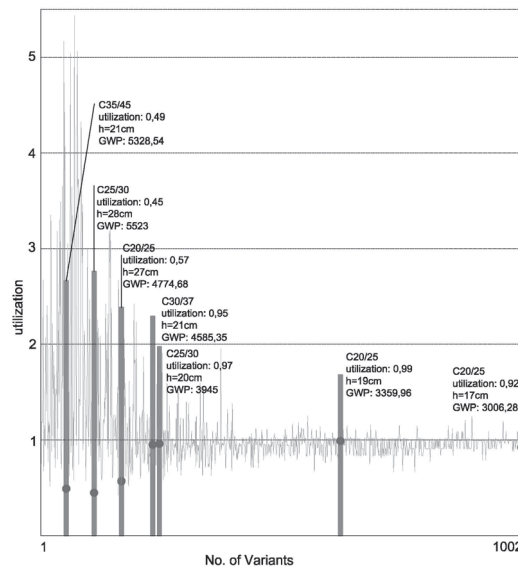


Abbildung 3.32: Einkriterielle Optimierung mit Nebenbedingungen einer 4-Punkt gelagerten Stahlbetondeckenplatte [HHR⁺14b]

sche Modelle. Hierzu gehört nach [AJK⁺95] unter anderem das Simulated Annealing. Das Optimierungsverfahren des Simulated Annealing basiert im Wesentlichen auf einer Analogie zum Verhalten der Atome in einer Metallschmelze während des Abkühlungsprozesses. In ([AJK⁺95], S. 19) ist dieses Verfahren wie folgt beschrieben: „Zu Beginn befinden sich die Atome in der Schmelze in völliger Unordnung. Beim Abkühlen streben die Atome die energetisch günstigsten Plätze an. Das sind die Plätze mit minimaler Energie, die in einer regelmäßigen Struktur, meistens einem Gitter, angeordnet sind. Dadurch ergibt sich eine regelmäßige Struktur, wenn jedes Atom seinen optimalen Platz einnimmt. Um von einem Platz in einem lokalen Energieminimum zu einem Platz niedrigerer Energie gelangen zu können, müssen die Atome einen energetisch ungünstigeren Zwischenzustand durchlaufen. Dies ist bei hoher Temperatur leichter als bei niedrigerer Temperatur, da hier die temperaturbedingte Bewegung der Atome höher ist. Sinkt die Temperatur, werden Lageänderungen der Atome immer unwahrscheinlicher.“

Des Weiteren gibt es eine Vielzahl klassischer Optimierungsverfahren, welche als mathematische, lineare oder nichtlineare Optimierung bezeichnet werden. Der Einsatz dieser Methoden eignet sich für spezielle Aufgabenfelder. Hierbei sind die Zielfunktionen, die Nebenbedingungen und die Optimierungsvariablen im Vorfeld genau festzulegen. Diese Anforderungen erfordern zum einen ein umfangreiches Problemwissen und schränken die Anwendungsbreite stark ein. Zum anderen können auf diese Weise beschriebene Optimierungsaufgaben in sehr kurzen Rechenzeiten gelöst werden. In Maute [Mau98], Bletzinger [Ble90], Schumacher [Sch05] und Burkhard und Zimmermann [BZ12] werden diese Verfahren eingehend beschrieben.

4 Nachhaltigkeit im Bauwesen

Der Begriff der Nachhaltigkeit ist eng mit dem *Drei-Säulen-Modell* verknüpft. Anhand dieses Modells wird deutlich, dass nachhaltige Entwicklung nur möglich ist, wenn die ökonomische, ökologische und soziale Nachhaltigkeit Berücksichtigung findet. Die ökonomische Nachhaltigkeit beschreibt dabei den bewussten wirtschaftlichen Umgang einer Gesellschaft mit ihren Ressourcen, sodass nachfolgende Generationen diese Lebensweise ohne Einbußen fortführen können. Sofern eine Gesellschaft mit natürlichen Ressourcen bewusst umgeht und deren Verfügbarkeit nicht minimiert werden die Kriterien der ökologischen Nachhaltigkeit bedient. Die Aspekte der sozialen Nachhaltigkeit werden durch die Vermeidung sozialer Konflikte und durch die zivilisierte Lösung von Spannungen beschrieben.

In den vorangegangenen Abschnitten werden verschiedene Optimierungsansätze für Tragwerke und Bauwerke im Bauwesen diskutiert. Diese Ansätze fokussieren in erster Linie die mechanischen Eigenschaften von Bauteilen und deren Optimierung. Jedoch ist im Hinblick auf die zunehmende Verknappung von Rohstoffen und Energiequellen eine ganzheitlicher Betrachtung notwendig. Diese Vorgehensweise kann unter dem Überbegriff des nachhaltigen Entwerfens zusammengefasst werden. In den letzten Jahren ist der Anspruch hin zu materialsparenden Bauweisen stetig gestiegen. Dies ist auch auf die gesteckten politischen Klimaziele zurückzuführen, vgl. Khouli et al. [KJZ14]. Durch die Umsetzung der Wärmeschutzverordnungen, Energieeinsparverordnungen bis hin zur Realisierung von Plusenergiehäusern sinkt der Gesamtenergieaufwand für Bauwerke, vgl. Abbildung 4.1. Gleichzeitig rücken die Material- und Energieaufwendungen für die eigentliche Tragkonstruktion in den Mittelpunkt der Betrachtungen.

Dem Anspruch nachhaltiger Bauweisen kann nur durch eine Betrachtung der Bauteile und Baustoffe hinsichtlich der Material- und Energieaufwendungen über ihren gesamten Lebenszyklus in Form von Ökobilanzierungen Rechnung getragen werden. Die Umsetzung dieser Ansprüche wird auch über verschiedene Nachhaltigkeitszertifikate (DGNB, LEED, BREEAM usw.) sichergestellt und stellt für viele Auftraggeber eine wesentliche Entscheidungsgrundlage für die Errichtung nachhaltiger Gebäude dar.

Nachfolgend werden verschiedene Ansätze zur Betrachtung der Nachhaltigkeit der Tragkonstruktion von Gebäuden unter besonderer Berücksichtigung von Faserverstärkten Kunststoffen und im Speziellen von adaptiven Tragwerken erörtert.

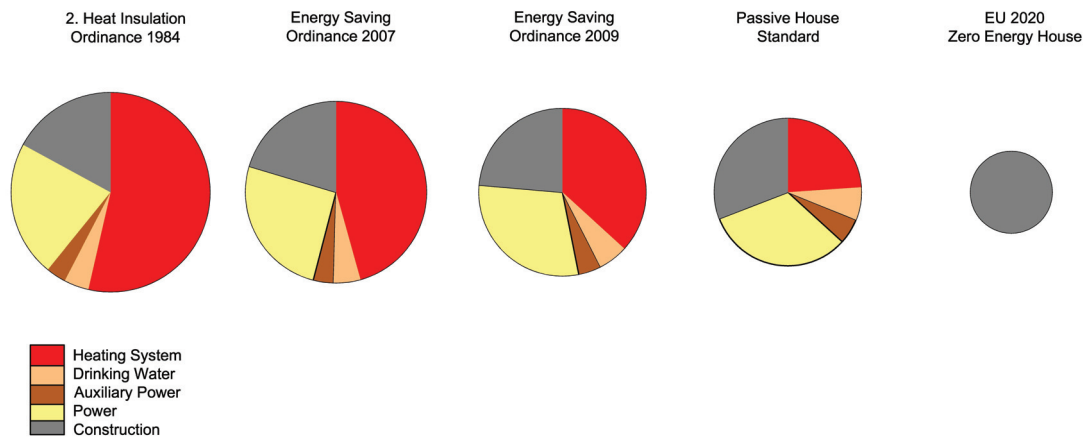


Abbildung 4.1: Reduzierung des Primärenergiebedarfs von Joost Hartwig nach [FHHZ13]

4.1 Gebäudeökobilanzierung

Die Ermittlung der Umweltwirkungen von Tragwerken und Bauwerken können mithilfe verschiedener Untersuchungsmethoden erfolgen. In diesem Bereich hat sich die Ökobilanzierung (Life Cycle Assessment, kurz LCA) als gängige Methode etabliert, vgl. Heidenreich et al. [HHR14a] und Hollberg et al. [HHR⁺14b]. Diese Methode ist in ISO 14040 [DIN06] geregelt. Innerhalb einer Ökobilanzierung werden sämtliche Material- und Energieflüsse von der Herstellung bis zur Entsorgung verschiedenen Umweltauswirkungen zugeordnet [KJZ14]. Die Ergebnisse einer Ökobilanzanalyse müssen nach [KJZ14] in jedem Fall als Abschätzungen verstanden werden, da aufgrund von Modellungenauigkeiten, unscharfen Datengrundlagen und teilweise bisher nicht abschätzbaren Umweltauswirkungen Unsicherheiten bestehen. Khouli et al. [KJZ14] schlägt eine relativierende Sensitivitätsanalyse vor.

4.1.1 Umweltproduktdeklarationen

Im Bauwesen werden Lebenszyklusanalysen sehr häufig auf Basis von Umweltproduktdeklarationen, kurz EPD, erstellt, vgl. [HHR14a], [HHR⁺14b]. EPDs werden für Baustoffe und Bauprodukte vom Institut für Bauen und Umwelt e.V. [IBU14] veröffentlicht. Die verfügbaren Deklarationen umfassen gängige Produkte des Bauwesens. Hierzu zählen im Bereich der Materialien für Tragwerkkonstruktionen unter anderem die Baustoffe Stahl, Holz und Beton. Die in den Produktdeklarationen spezifizierten Baustoffe sind nach DIN EN 15804 [DIN14] hinsichtlich der Umweltwirkungen entsprechend der einzelnen Phasen eines Produktes aufgeschlüsselt [HHR⁺14b]. Zudem sind den einzelnen Materialien verschiedene Wirkungs- und Umweltindikatoren zugeordnet. In Tabelle 4.1 sind verschiedene Indikatoren zusammengefasst und kurz beschrieben. Weiterführend sind diese Umweltindikatoren für fünf Betonfestigkeitsklassen exemplarisch angegeben, vgl. Tabelle 4.2. In Abbildung 4.2 sind die einzelnen Phasen eines Produktes zusammengefasst. Hierbei umfassen die Module A1-A5 die Prozesse der Herstellung, die Module B1-B7 die Aufwendungen

Tabelle 4.1: Wirkungsindikatoren für Ökobilanzen nach Khouli et al. [KJZ14]

Kurzbezeichnung	Bezeichnung	Einheit
PEI	Primärenergie nicht erneuerbar	MJ
PEI	Primärenergie erneuerbar	MJ
GWP	Klimagase	kg CO ₂ -Äq.
ODP	Ozonabbau	kg R11-Äq.
AP	Versauerung	kg SO ₂ -Äq.
EP	Überdüngung	kg PO ₄ -Äq.
POCP	Sommersmog	kg C ₂ H ₄ -Äq.

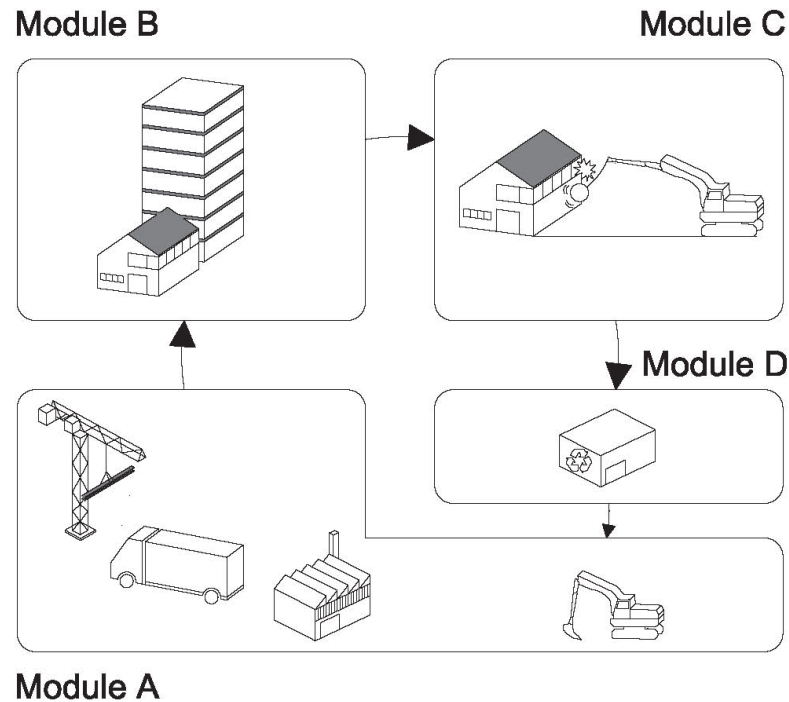


Abbildung 4.2: LCA Module

infolge Nutzung, die Module C1-C4 die Szenarien des End-of-Life und das Modul D das Recycling [HHR⁺14b]. Jedoch können aufgrund der unterschiedlichen Datenlage und Systemgrenzen nicht für alle Materialien die Angaben über alle Phasen getroffen werden. Bei der Betrachtung des Treibhauspotenzials (GWP) üblicher Betone wird deutlich, dass alle Phasen deklariert sind und somit eine umfangreiche Datenbasis zur Verfügung steht, vgl. Tabelle 4.3.

Bei der Ökobilanzierung von Stahlbauteilen sind die im Modul D angesetzten hohen Recyclingmargen zu berücksichtigen, welches an dem 'großen' negativen Wert erkennbar ist. Zudem wird deutlich, dass im Vergleich zu den Betonen entsprechend der EPDs nicht alle Phasen deklariert sind, vgl. Tabelle 4.4. Diese Felder sind mit dem Kürzel *MND* - *Modul nicht deklariert* gekennzeichnet.

Sofern unterschiedliche Bauteile und Materialien vergleichend analysiert werden sollen, ist darauf zu achten, dass nur Module Anwendung finden können, die bei allen Materialien bekannt sind. Als beispielhafte materialübergreifende Ökobilanzierungen von Tragwerken

Tabelle 4.2: Umweltindikatoren verschiedener Betonsorten (Werte aus [IBU14], zusammengefasst in [HHR⁺14b] und [HHR14a])

Indikator	Einheit	C20/25	C25/30	C30/37	C35/45	C50/60
PET	MJ	654,75	717,75	797,75	960,75	1389,75
PENRT	MJ	654,75	717,75	797,75	960,75	1389,75
GWP	CO ₂	176,85	197,25	218,35	253,75	332,65
ODP	kg R11	5,79E-7	6,02E-7	6,43E-7	7,06E-7	8,64E-7
AP	kg SO ₂	0,297	0,321	0,348	0,397	0,514
EP	kg PO ₄	0,0515	0,055	0,0596	0,0672	0,086
POCP	kg C ₂ H ₄	0,037	0,040	0,043	0,049	0,0625
ADPel	kg Sb	0,00034	0,000038	0,00042	0,00047	0,00055
ADP _{foss}	MJ	608,64	663,54	734,14	877,44	1276,14
Cement	M.-%	11,1	12,4	13,7	14,5	16,8

Tabelle 4.3: Global Warming Potential verschiedener Betonsorten (Werte aus [IBU14], zusammengefasst in [HHR⁺14b] und [HHR14a])

Betonfestigkeitsklasse	Einheit	Module						A+C	Total
		A1-A3	A4	A5	B	C1-C3	D		
C20/25	m ³	190,71	3,0	1,35	0	4,87	-23,08	199,93	176,85
C25/30	m ³	211,11	3,0	1,35	0	4,87	-23,08	220,33	197,25
C30/37	m ³	231,91	3,3	1,35	0	4,87	-23,08	241,43	218,35
C35/45	m ³	265,11	5,5	1,35	0	4,87	-23,08	276,83	253,75
C45/55	m ³	313,31	15,4	1,35	0	4,87	-23,08	311,85	311,85
C50/60	m ³	334,71	14,8	1,35	0	4,87	-23,08	355,73	332,65

seien die Arbeiten von Jönsson et al. [JBT98] und Menna et al. [MAJ⁺13] genannt.

Die in Tabelle 4.3 zusammengefassten Betonsorten verdeutlichen, dass Betone höherer Festigkeit größere Werte des Global Warming Potentials aufweisen. Der Zement ist zu 90 % für das Treibhauspotenzial von Betonen verantwortlich [HHR⁺14b], [IBU14]. Bei der Untersuchung von Stahlbetondeckenplattentragwerken wie auch Stahlbetonschalentragwerken kann die höhere Betonfestigkeit hinsichtlich der Reduzierung der Bauteilstärke genutzt und Material eingespart werden. Im Hinblick auf eine ganzheitliche ökologische Bilanzierung wird in [HHR⁺14b] und [HHR14a] geprüft, inwieweit sich das Gesamttreibhauspotenzial infolge Minimierung der Bauteilstärke, aber höherem Treibhauspotenzial des höherwertigen Betons auswirkt, vgl. Formel (4.1). Es kann hierbei festgestellt werden, dass ein Optimum aus Bauteilstärke und GWP beim Einsatz von Betonen 'mittlerer Festigkeit' erzielt werden kann, vgl. Abb. 4.3.

$$\min. GWP \in \mathbb{R} \quad (4.1)$$

Tabelle 4.4: Global Warming Potential von Baustahl (Werte aus [IBU14])

Stahl	Einheit	Module						A+C	Total
		A1-A3	A4	A5	B	C1-C3	D		
Baustahl	t	1735	MND	MND	MND	MND	-959	1735	776

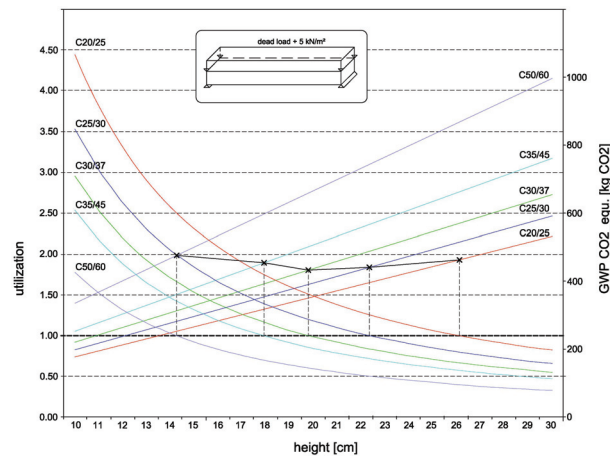


Abbildung 4.3: Auslastung und GWP für eine einachsige gespannte Deckenplatte [HHR⁺14b]

4.2 Nachhaltigkeitsbetrachtung von Faserverbundwerkstoffen

In den vorangegangenen Abschnitten werden die Möglichkeiten der Ökobilanzierung gängiger Baustoffe und Konstruktionen im Bauwesen zusammengefasst, wobei ökologische Produktdeklarationen herangezogen werden. Für die ökologische Betrachtung von Kunststoffen bzw. Faserverbundschalenstrukturen stehen derzeit keine ausreichenden ökologischen Produktdeklarationen zur Verfügung. Aus diesem Grund basiert die ökologische Einschätzung auf den zur Verfügung stehenden Grunddaten. Hierbei können die Angaben bezüglich des *Carbon footprint* bzw. der *Embodied Energy* Anwendung finden. Bei der ökologischen Betrachtung von Faserverbundwerkstoffen ist zu berücksichtigen, dass aufgrund des freien, für die jeweilige Anwendung optimierten Materialaufbaus kaum Verallgemeinerungen möglich sind. Im Nachfolgenden werden für einzelne Bauteile unterschiedliche Bilanzierungsansätze vorgestellt.

4.2.1 Die *Embodied Energy* als Indikator für Faserverbundwerkstoffe

Die ökologische Betrachtung hinsichtlich der *Embodied Energy*, häufig auch als Graue Energie bezeichnet, umfasst sämtliche Energiemengen, welche für die Produktion, den Transport, die Nutzung und die Entsorgung eines Produktes (Bauteils) anfallen. In Tabelle 4.5 sind die von Hammond und Jones [HJ11] als auch Althaus und Lehman [AL11] aufbereiteten Werte bezüglich der *Embodied Energy* für ausgewählte Baustoffe im Vergleich zu glasfaserverstärkten Kunststoffen gegenübergestellt. Die Anwendung der Kennwerte für Faserverbundwerkstoffe wird häufig für die Bewertung unterschiedlicher Brückensysteme genutzt [MHH14; Rys03]. In diesen Untersuchungen können Faserverbundbrückentragwerke aufgrund ihres hohen Widerstandes gegenüber Umwelteinwirkungen und den daraus resultierenden verlängerten Lebenszyklen — auch ohne die notwendige Erneuerung etwaiger

Tabelle 4.5: *Embodied Energy* verschiedener Baustoffe, nach [HJ11] und [AL11]

Material	<i>Embodied Energy</i> <i>MJ/kg</i> [HJ11]	<i>Embodied Energy</i> <i>MJ/kg</i> [AL11]	<i>Embodied Carbon</i> <i>kgCO₂/kg</i> [HJ11]
Glasfaserverstärkte Kunststoffe (GFK)	100	82,6	8,10
Beton C16/20	0,70		0,093
Beton 20/25	0,74		0,100
Beton 25/30	0,78		0,106
Beton 28/35	0,82		0,112
Beton 32/40	0,88		0,123
Beton 40/50	1,00		0,141
Baustahl	20,10	22,5	1,37
Edelstahl	56,70		6,15
Aluminium	155	171	8,24

Schutzanstriche — gute Werte hinsichtlich Nachhaltigkeit bescheinigt werden. Zudem ist erkennbar, dass die Bewertung der Nachhaltigkeit immer in Bezug auf die spezifische Untersuchungsaufgabe erfolgen muss, Verallgemeinerungen sind kaum möglich.

$$\min. \text{Embodied Energy}_{FVK} \quad (4.2)$$

4.2.2 Der *Carbon Footprint* als Indikator für Faserverbundwerkstoffe

Die Ermittlung des Carbon Footprint umfasst die Gesamtemissionen an CO_2 und weiteren Treibhaus- bzw. Klimagasen (Methan, Lachgas usw.), welche bei der Herstellung eines Produktes in den Prozessen Rohstoffgewinnung bis Entsorgung bzw. Wiederverwertung anfallen. In Abb. (4.4, links) sind diese Klimagasemissionen für gängige Baustoffe und GFK zusammengefasst. Allerdings ist hierbei die Emission pro Kilogramm des jeweiligen Materials aufgetragen. Zur Sicherstellung einer realistischen Vergleichbarkeit ist in Abb. (4.4, rechts) der Vergleich für identische Eigenschaften (Zugfestigkeiten und Biegemodule) gezogen. Hierbei wird deutlich, dass der Einsatz glasfaserverstärkter Kunststoffe vor dem Hintergrund der gesamtenergetischen und -ökologischen Betrachtung nachhaltig sein kann, wobei stets einzelne Projektaspekte und -spezifikationen Berücksichtigung finden müssen. Zudem ist eine geeignete funktionelle Einheit zu definieren. In Abb. 4.4 ist die funktionelle Einheit der gleichen Bauteilstärke bzw. des gleichen Biegemoduls gewählt.

4.2.3 Die *Reißlänge* als Indikator für Faserverbundwerkstoffe

Anhand Abb. 4.4 wird deutlich, dass bei der Berücksichtigung einer geeigneten funktionellen Einheit gegenüber der alleinigen materialspezifischen Betrachtung große Unterschiede auftreten können. In Bezug auf Faserverbundwerkstoffe ist dies durch die guten mechanischen Eigenschaften und die hohe Widerstandskraft gegenüber Umwelteinwirkungen be-

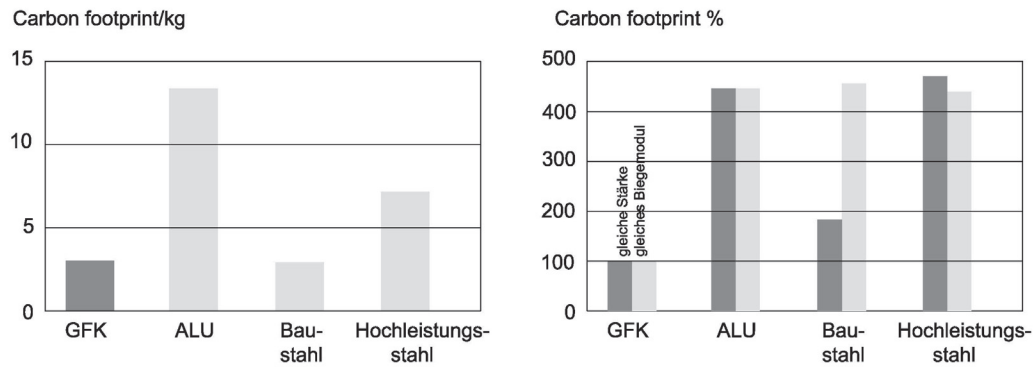


Abbildung 4.4: Gegenüberstellung Carbon Footprint (links: pro kg, rechts: prozentual) nach [Fib14]

Tabelle 4.6: mechanische Eigenschaften ausgewählter Faserwerkstoffe, Werte nach [RC09]

Werkstoff	Dichte [g/cm ³]	Zugfestigkeit [GPa]	Zug-E-Modul [GPa]	Lineare Dehngrenze [%]	Reißlänge [km]
Stahl	7,8	1,8 - 2,2	210	1,4 - 1,7	max. 30
Glasfasern	2,6	1,8 - 3,0	72 - 83	2 - 3	70 - 120
Kohlenstofffasern	1,7 - 1,9	2,4 - 7,0	230 - 700	0,5 - 2,3	150 - 380
Aramidfasern	1,4 - 1,5	2,3 - 3,5	60 - 130	2,0 - 4,0	180 - 240
Flachs	max. 1,5	max. 0,85	max. 25	1,4 - 4	max. 60
Jute	max. 1,5	0,32	27	2,5	max. 25
Ramie	1,5	max. 0,9	max. 24	2,5	max. 61
Baumwolle	1,5	max. 0,75	max. 9	max. 10	max. 50

gründet. Des Weiteren ist die hohe Leistungsfähigkeit zu einem hohen Prozentsatz auf die hervorragenden Eigenschaften der eingebetteten Fasermaterialien zurückzuführen. Deren Eigenschaften werden häufig in der Betrachtung der *Reißlänge* gegenüberstellend bewertet, vgl. Abb. 4.5. Die Reißlänge charakterisiert die Länge eines Bauteils, bei der ein nur infolge des Eigengewichts belastetes Bauteil hängend zerreißt. Hierbei wird deutlich, dass Glasfasern bzw. Kohlefasern ein Vielfaches der Reißlänge gegenüber Stahl aufweisen.

4.3 Nachhaltigkeitsbetrachtung adaptiver Systeme

Adaptive Systeme können aufgrund ihrer anpassbaren Material- und Steifigkeitseigenschaften materialsparender als konventionelle Tragwerkssysteme ausgeführt werden. Teuffel [Teu04] erörtert, dass die in den Normen bezüglich der Lastannahmen verankerten Lasten nur sehr selten bis nie in voller Höhe eintreten. Somit sind nach 'Norm' geplante und gebaute Bauwerke für einen großen Teil ihrer Lebensdauer überdimensioniert. Auch Senatore et al. [SDH⁺11] verweisen darauf, dass die Wahrscheinlichkeit des Auftretens maximaler Windfrequenzen von bis zu 5 Hz äußerst selten ist. Teuffel und Senatore et al. schlagen somit vor, adaptive Tragwerke zu planen und die für die Formänderungsarbeit

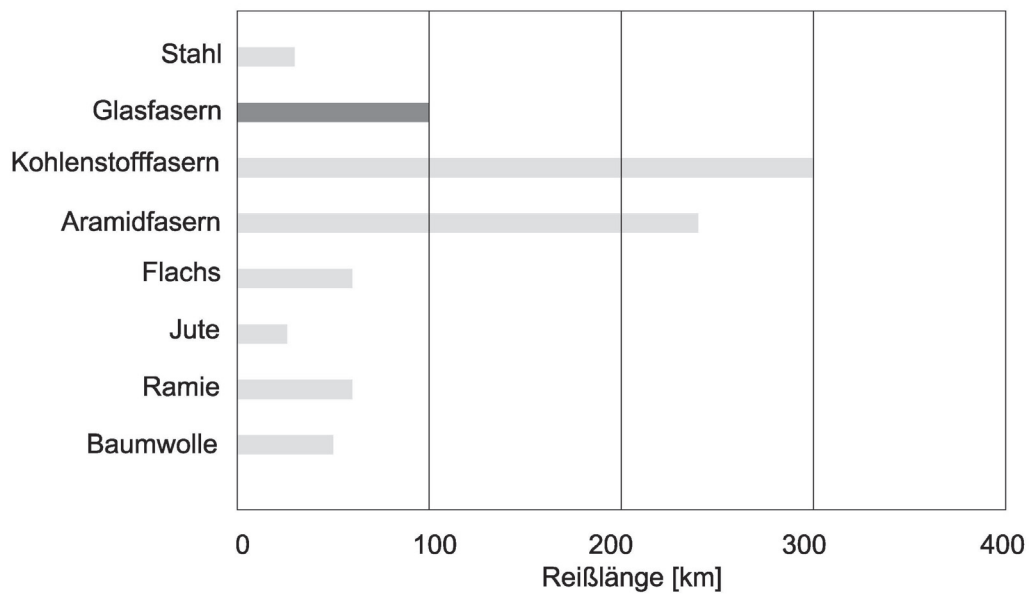


Abbildung 4.5: Reißlänge ausgewählter Faserwerkstoffe, Werte nach [RC09]

notwendige Energie der Aktoren zu ermitteln. Einen weiteren Ansatz zur Optimierung adaptiver Schalentragwerke stellt hierbei die Minimierung der Adaptionsarbeit ($W_{Adaption}$) als Zielkriterium zur Minimierung der Verformungen oder Schnittgrößen dar, vgl. Pawlowski [Paw06]. Nach Pawlowski ([Paw06], S. 104) handelt es sich bei der Adaptionsarbeit „einerseits ... um die Arbeit der adaptierenden Kräfte. Andererseits ist die Adaptionsarbeit die Arbeit, um deren Betrag sich das innere Potential des Tragwerks während der Adaption ändert.“

$$\min. W_{Adaption} \quad (4.3)$$

$$W_{Adaption} = \sum_k W_{aussen} = \int F_{Adaption} * du_{Adaption} = - \sum \Delta \Pi_{innen} \quad (4.4)$$

$$-\Pi_{innen} = \frac{1}{2} \int_l \frac{1}{EA} * N^2 dx + \frac{1}{2} \int_l \frac{1}{EA} * M^2 dx \quad (4.5)$$

Die ermittelte Arbeit muss selbstverständlich den Werten der notwendigen *Embodied Energy* der passiven Struktur zugeschlagen werden. Senatore et al. [SDH⁺11] verdeutlichen, dass infolge der Aktivierung eine adaptive Struktur geringe Werte der *Embodied Energy* gegenüber einer passiven Struktur aufweist. Neben der Aktivierungsenergie sind im Rahmen einer ganzheitlichen Nachhaltigkeitsbetrachtung adaptiver Systeme auch die Aufwendungen hinsichtlich der zusätzlich implementierten Smart Materials zu ermitteln und zu berücksichtigen. Jedoch stehen derzeit keine ausreichenden ökologischen Kennwerte für *Smart Materials* zur Verfügung.

Die aufgezeigte Optimierung adaptiver Strukturen auf Basis der Kennwerte der *Embodied*

Energy der passiven Strukturen, wie auch der Smart Materials und der zu verrichtenden Arbeit, der *Operational Energy* der Aktoren stellt eine hervorragende Grundlage zur Optimierung adaptiver nachhaltiger Strukturen dar. Die Optimierung sämtlicher Kriterien definiert hierbei nachhaltige adaptive Systeme.

$$\begin{aligned}
 & \min. EE_{FVK} \\
 & \min. EE_{Smart\ Material} \\
 & \min. OE_{Aktor}
 \end{aligned} \tag{4.6}$$

5 Parametrisierung im Bauwesen

Die Prozesse des Bauwesens werden immer stärker durch die Digitalisierung geprägt. Speziell der Entwurfsprozess aber auch die Phasen der Erstellung von Plänen und Zeichnungen ist seit mehreren Jahren sehr stark durch computergestützte Werkzeuge definiert. Die dabei zum Einsatz kommenden CAD-Programme unterliegen einer ständigen Weiterentwicklung. So kann der konsequente Übergang von 2D-Zeichnungen hin zu 3D-Modellen genannt werden. Zudem besteht in immer mehr CAD-Systemen die Möglichkeit der Generierung freier, komplexer Formen, welche aufgrund der vielfältigen Formensprache zunehmend zum Einsatz kommen. Dennoch folgen nach Menges [Men10] aktuelle CAD-Modelle den Regeln von Zeichenpapier, wobei die Gesetze der Physik keine Berücksichtigung finden.

Auf Basis der digitalen Planungsdaten kann mit Hilfe geeigneter Schnittstellen eine computergesteuerte Fertigung einzelner Bauteile erfolgen. Vor allem im Holzbau wird auf diese Weise der Abbund durchgeführt. Hierbei wird deutlich, dass der Planungsprozess komplexer wird und die einzelnen Vorgänge verschmelzen.

Aber auch die Analyseaspekte und Nachweise unterliegen hinsichtlich der Ressourceneffizienz und Nachhaltigkeit gesteigerten Ansprüchen, wobei aufgrund der steigenden Formen- und Systemkomplexität 'Handrechnungen' mitunter nicht mehr zielführend sind. So werden Trag- und Bauwerke in Bezug auf den Energieaufwand für die Erstellung, den Energieverbrauch für die Nutzung und den Energieeintrag durch photovoltaische und solarthermische Systeme analysiert. Aber auch die statische Analyse und Dimensionierung der einzelnen Bauteile ist zu überprüfen und zu berechnen. Die Berechnung dieser Aspekte erfolgt derzeit häufig in Form von getrennt betrachteten Einzelanalysen auf Basis spezialisierter Softwareapplikationen. Diese Betrachtungsansätze scheinen auf den ersten Blick sehr unterschiedlich, sind jedoch allesamt voneinander abhängig. So kann die Maximierung des solaren Energieeintrages eine negative Auswirkung auf das Tragverhalten haben sowie größere Bauteilabmessungen und somit mehr Material (*Embodied Energy*) erfordern. Diese enge Verknüpfung und den damit verbundenen hohen Anspruch fassen Knippers und Kamp in ([KK12], S. V01-8) wie folgt zusammen: „Statische Analysen und Dimensionierung der Struktur sind nachgeschaltet und verlaufen eher parallel ohne eine Möglichkeit der direkten Einflussnahme auf die Geometrie, führen aber unter Umständen zu Anpassungen am parallelen Geometriemodell.“ Um diesem ganzheitlichen Formfindungsansatz gerecht zu werden, sind allumfassende Geometrie- und Strukturmodelle und Schnittstellen zu entwickeln. Knippers und Kamp ([KK12], S. V01-8) formulieren folgende noch zu lösende Aufgabe: „Eine Aufgabe für Entwicklung und Forschung ist daher die Integration von mechanischen Formfindungsprinzipien in die automatisierte Prozesskette von Entwurf bis Produktion, wie dies im Augenblick nur beim Entwurf von zugbeanspruchten Mem-

brantragwerken der Fall ist.“

Des Weiteren beschreibt Menges ([Men10], S. 421-422) den Unterschied und die vielfältigen Möglichkeiten zwischen Computer Aided Design und Computational Design: „Im Gegensatz zum Computer Aided Design macht Computational Design die Beziehung zwischen Form, Information und Formwerdung explizit. Die damit verbundene Offenlegung der Wechselbeziehungen aus algorithmischer Er- und Verarbeitung von Informationen ermöglicht es dem Entwerfenden, den Formgenerierungsprozess durch die spezifischen Eigenheiten und Einschränkungen der Materialisierung zu 'informieren'. Computational Design ermöglicht also ein Verständnis von Form, Material, Struktur, Herstellung und Fertigung als systematische Wechselbeziehungen, in deren Möglichkeitspielraum sich der Entwurf entfalten kann. Diese wechselseitige Rückkopplung aus virtuellem Rechnermodell und materieller Konstruktion im computerbasierten Entwurfsprozess erlaubt eine neue Art der Synthese von Form- und Materialwerdung.“ Um diesen Ansprüchen gerecht zu werden, bilden parametrische Geometriemodelle eine wesentliche Grundlage, sind aber im Hinblick auf die einzelnen Untersuchungen anzupassen. Nachfolgend werden die Grundlagen parametrischer Modelle im Bauwesen erläutert. Weiterführend wird eine geschlossene Prozesskette zur Berücksichtigung verschiedener Analyseaspekte vorgestellt, wobei die Vorteile einer gemeinsamen parametrischen Geometriedefinition erörtert werden. Zudem wird gezeigt, inwieweit die Ergebnisse der Analysen in das geometrische Grundmodell zurückgeführt werden können und auf diese Weise für alle weiteren Betrachtungen als 'neue' Ausgangsvarianten dienen können. Zudem wird das entwickelte parametrische Gesamtmodell hinsichtlich der Berücksichtigung und der Analyse adaptiver Tragstrukturen erweitert.

5.1 Parametrische Modelle

Die Generierung parametrischer Modelle für den Entwurf oder die Berechnung eines Bauwerks erfordert in erster Linie spezielle Computerprogramme, welche die Abbildung eines Objektes anhand von Parametern ermöglichen und verarbeiten können. Die Anzahl derartiger Softwareprodukte ist noch als gering einzuschätzen.

Parametrische Modelle werden von Planern zur Lösung der unterschiedlichsten Aufgaben eingesetzt. Dabei müssen die jeweils notwendigen Parameter definiert werden. Ebenso sollten keine Parameter definiert werden, welche für die eigentliche Aufgabe nicht von Bedeutung sind. Auf diese Weise kann die parametrische Modellabbildung übersichtlich gehalten und die notwendige Verarbeitungs- und Berechnungszeit reduziert werden. In Abbildung 5.1 sind die notwendigen Parameter zur Erzeugung geometrischer Grundformen für parametrische CAD-Modelle zusammengefasst. Darüber hinaus können ergänzende Parameter für weitere Analysen hinzugefügt werden. In Abb. 5.1 ist dies beispielhaft für belichtungs-technische, energetische und tragwerksplanerische Analysen verdeutlicht. Hierbei wird die enge Verbindung der einzelnen Modelle ersichtlich, da alle Betrachtungsweisen auf die grundlegend gleichen geometrischen Parameter zurückgeführt werden können.

Im Nachfolgenden werden die Anforderungen an parametrische CAD-Modelle und parametrische Berechnungsmodelle zur Belichtungsanalyse, statischen Analyse und zur Lebenszyklusbetrachtung näher untersucht.







Element	CAD-Modell	energetische Analyse/Lichtanalyse	Berechnungsmodell	Lebenszyklusmodell
grafische Darstellung	parametrische Beschreibung des Geometriemodells	Parameter für Belichtungs- und energetische Analysen als Ergänzung zum parametrischen CAD-Modell	Parameter für statische Analyse als Ergänzung zur parametrischen CAD-Modellbeschreibung	Parameter für Lebenszyklusanalyse als Ergänzung zur parametrischen CAD-Modellbeschreibung
Punkt 	Knoten-Nr. Koordinaten $x y z$		Festhaltungen $u_x, u_y, u_z,$ $rot\ x, rot\ y, rot\ z$	
Linie 	Knoten-Nr. Koordinaten $x y z$ Linie Start- und Endknoten	Profilabmessungen Textur, Farbe, Transparenz Kontaktbedingungen	Profil- und Materialkennwerte Lasten, Verbindungen	Profil- und Materialkennwerte Umweltwirkungsindex
Flächenelement 	Knoten-Nr. Koordinaten $x y z$ Randkanten Start- und Endknoten Eckpunkte Knoten-Nr. Elementdicke [m]	Textur, Farbe Transparenz Reflexionsgrad Kontaktbedingungen	Profil- und Materialkennwerte Lasten Verbindungen, Lagerungen Bettungskennwerte	Profil- und Materialkennwerte Umweltwirkungsindex
Schalenelement 	Knoten-Nr. Koordinaten $x y z$ Randkanten Start- und Endknoten Eckpunkte Knoten-Nr. Schalendicke [m]	Textur, Farbe Transparenz Reflexionsgrad Kontaktbedingungen	Profil- und Materialkennwerte Lasten Verbindungen, Lagerungen Bettungskennwerte	Profil- und Materialkennwerte Umweltwirkungsindex
gekrümmtes Schalenelement 	Knoten-Nr. Koordinaten $x y z$ Randkanten Start- und Endknoten Eckpunkte Knoten-Nr. Schalendicke [m] Krümmungsradius [1/m]	Textur, Farbe Transparenz Reflexionsgrad Kontaktbedingungen	Profil- und Materialkennwerte Lasten Verbindungen, Lagerungen Bettungskennwerte	Profil- und Materialkennwerte Umweltwirkungsindex
Volumenelement 	Knoten-Nr. Koordinaten $x y z$ Randkanten Start- und Endknoten Eckpunkte Knoten-Nr. Elementdicke durch Knotenabstand definiert	Textur, Farbe Transparenz Reflexionsgrad Kontaktbedingungen	Profil- und Materialkennwerte Lasten Verbindungen, Lagerungen Bettungskennwerte	Profil- und Materialkennwerte Umweltwirkungsindex

Abbildung 5.1: parametrische Modelle — Darstellung der notwendigen Parameter

5.1.1 Parametrische CAD-Modelle

Parametrische Modelle ermöglichen die Erzeugung von nicht statischen CAD-Modellen. Das gesamte Modell wird in seine ursprünglichen Einzelemente (Knoten, Linien, Flächen und Volumenelemente) unterteilt und mit den zugehörigen Kennwerten (Knotennummer, Koordinaten und Abhängigkeiten untereinander) gespeichert, vgl. Abbildung 5.2. Nach Bollinger et al. werden in ([BGT10], S. 72) parametrische Modelle im Gegensatz zu konventionellen CAD-Modellen dahingehend beschrieben, dass nicht nur ein einzelner Zustand abgebildet wird, sondern „jeder Punkt, jede Kurve, jede Fläche, die in einem Modellierprogramm erzeugt“ wird und die entsprechenden x-, y- und z-Koordinaten gespeichert werden. Eine Variation der Ausgangslösung ist auf Grundlage der gespeicherten Bildungsprozesse und vorgegebener Regeln in beliebiger Anzahl möglich [BGT10].

Des Weiteren kann durch die Rückführung auf die logische und mathematische Beschreibung auf eine Änderung der Struktur oder eine Anpassung an sich ändernde Einflüsse im Planungsprozess schnell reagiert werden, wobei keine vollständige Neumodellierung notwendig ist.

Diese Art des Entwerfens wird nach Menges [Men10] als parameterbasierter Entwurf oder „Computational Design“ bezeichnet. Nach Menges ([Men10], S. 421) „wird der Architekt nicht durch den Rechner ersetzt, vielmehr wird hier die Rolle des Entwerfenden gestärkt: Der Architekt wandelt sich von einem Nutzer digitaler Prozesse zu deren Entwickler.“

Die Erzielung des gewünschten Ergebnisses wird nicht durch die Anfertigung von Skizzen, Zeichnungen, Plan und Modell erreicht sondern durch die „Entwicklung von Algorithmen oder generativen Regeln“ ([Men10], S. 421).

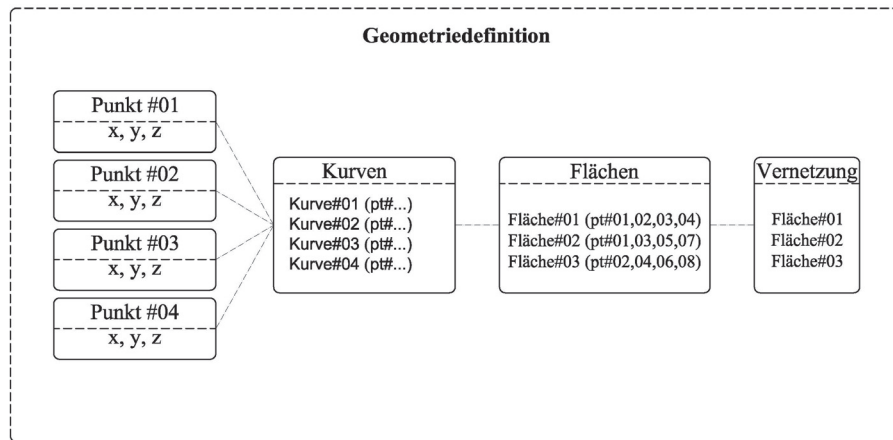


Abbildung 5.2: Grundaufbau parametrischer Geometriemodelle

Bei der Beschreibung eines parametrischen Modells fließt nach Schneider et al. [SBK12] „eine gewisse Menge an Wissen über das abzubildende Problem ein,“ wodurch einerseits 'stark strukturierte Modelle' unter Berücksichtigung einer genauen Problembeschreibung, vgl. Abb. (5.3, links) und andererseits 'schwach strukturierte Modelle' auf Basis einer weniger detaillierten Problemformulierung, vgl. Abb. (5.3, rechts) erstellt werden können. Als grundsätzlichen Unterschied sehen Schneider et al. [SBK12], dass bei der Veränderung stark strukturierter Modelle aufgrund großer Einschränkungen eher unbrauchbare Varianten ausgeschlossen werden können, wohingegen bei schwach strukturierten Modellen eher vielfältige Ergebnisse durch Variablenveränderung auftreten können und eine Vielzahl ungeeigneter Varianten auftreten wird. Dennoch können schwach strukturierte Modelle auch von Vorteil sein, „da sie in der Lage sind Varianten zu erzeugen, welche nicht bereits vom Modellschaffenden vorgedacht wurden“ [SBK12].

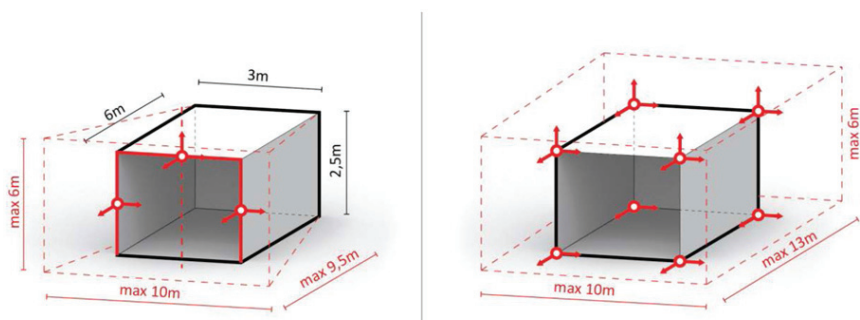


Abbildung 5.3: parametrische Modellierung [SBK12] des Sonnenhauses des Sokrates nach Treberspurg [Tre99]

5.1.2 Parametrische Tageslichtanalysemodelle

In Abschnitt 5.1.1 und Abb. 5.2 sind die grundlegenden notwendigen Variablen zur Definition und Generierung parametrischer CAD-Modelle dargelegt. Für weitergehende rechnerische Betrachtungen können diese Formulierungen genutzt und im Hinblick auf die für die einzelne Analyse relevanten Informationen und Randbedingungen erweitert werden. Basierend auf den Ausführungen von Schneider et al. [SBK12] wird die Verknüpfung zwischen parametrischem Geometriemodell und anschließender Tageslichtanalyse in Abb. 5.4 beispielhaft visualisiert. Die Erweiterung eines CAD-Modells hin zu einem Tageslichtanalysemodell bedingt hierbei Informationen bezüglich der Transparenzen, Farben der Oberflächen und Reflexionsgrade. Die Analyse kann durch die Anbindung an die parametrische Grundstruktur für eine Vielzahl unterschiedlicher Varianten erfolgen. Die für die eigentliche Analyse notwendige Software ist über geeignete Schnittstellen anzusteuern. In Abb. 5.5 sind Berechnungsergebnisse hinsichtlich der Tageslichtanalyse und -optimierung mithilfe evolutionärer Algorithmen des Sonnenhauses des Sokrates, vgl. Abb. 5.3 nach Schneider et al. [SBK12] dargestellt. Deutlich wird hierbei, dass infolge der Einschränkung der freien Variablen unterschiedliche Varianten ermittelt werden.

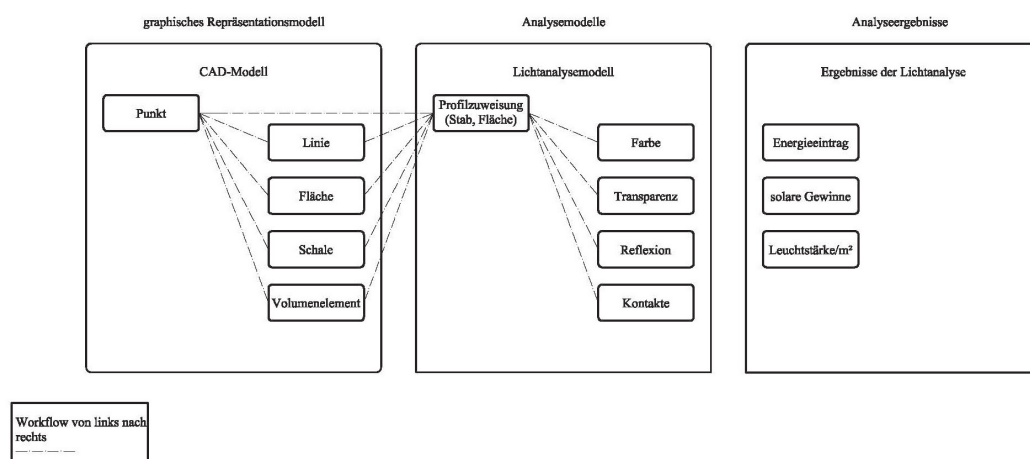


Abbildung 5.4: Lichtanalysemodell auf Basis parametrischer Geometriemodellierung

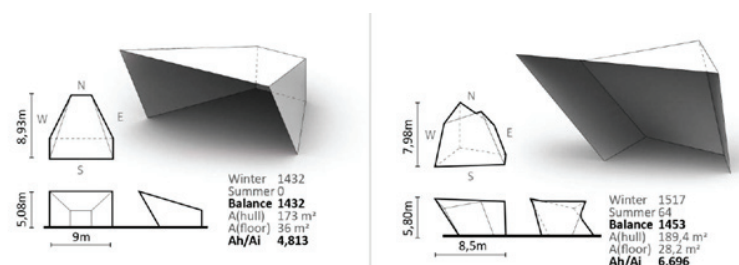


Abbildung 5.5: Sonnenhaus des Sokrates — Ergebnis Tageslichtanalyse (Auszug) nach Schneider et al. [SBK12]

5.1.3 Parametrische Modelle zur statischen Berechnung

Für die Definition parametrischer Modelle zur statischen Analyse kann grundlegend auf die Informationen des parametrischen CAD-Modells zurückgegriffen werden. Anhand von Abb. 5.6 wird deutlich, dass hierbei im Vergleich zur Tageslichtanalyse andere Zusatzinformationen festgelegt werden müssen, dennoch aber die gleiche Datenbasis Anwendung finden kann. Damit die gemeinsam genutzten parametrischen Geometriegrunddaten in ein Berechnungsmodell im Sinne der Tragwerksplanung überführt werden können, bedarf es der Kenntnis, in welcher Form die Daten vorliegen und in welcher Form die Übertragung an das Berechnungsprogramm erfolgen soll. So werden beispielsweise Bauteile für Visualisierungen entsprechend ihrer Stärke als Volumen definiert. Im Hinblick auf die statische Berechnung von Platten- oder Schalenelementen ist die Reduzierung auf die Mittelachse und die anschließende Definition der Bauteilstärke über die Berechnungssoftware notwendig. Aus diesem Grund ist es häufig zielführend auf die Grunddaten des CAD-Modells zuzugreifen und nicht auf die vorangestellten Daten einer anderen Analyse. Hierbei sind definierte Punkte in Knoten bzw. Knotenlager, Linien in Stabelemente und Flächen in Schalen- bzw. Plattenelemente zu überführen. Zudem bedarf es der Festlegung der Materialkennwerte, der Lasten und der Kontakte zwischen den einzelnen Elementen. So muss im Bereich der Statik die Verbindung hinsichtlich eingespannter oder gelenkiger Verbindungen festgelegt werden.

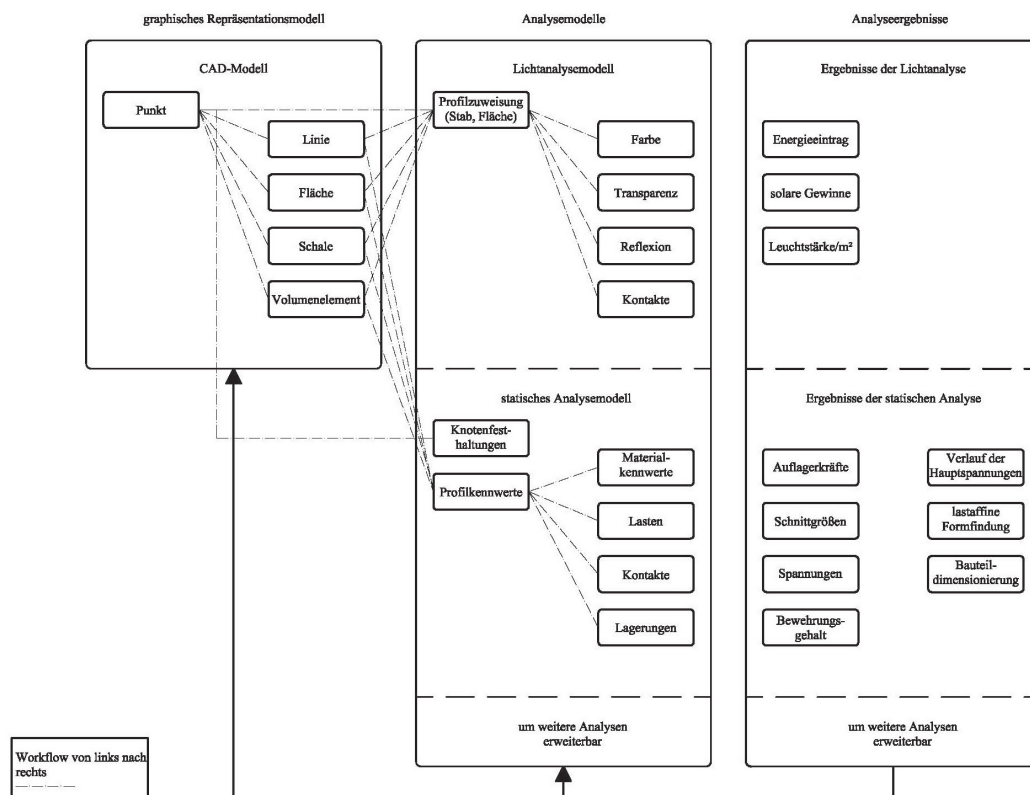


Abbildung 5.6: Statikanalysemodell auf Basis parametrischer Geometriemodellierung

Die Erstellung eines Berechnungsmodells im Sinne der Tragwerksplanung muss immer

vor dem Hintergrund der anzuwendenden Berechnungssoftware entwickelt werden. Viele Programme bieten für den Geometrieimport zeichnungsbasierte Schnittstellen (dwg- oder dxf-Dateien) an. Diese erfordern zwar keine Neumodellierung des statischen Modells, reagieren allerdings nicht automatisch auf parametrische Anpassungen im CAD-Modell. Es muss vielmehr jede neue Variante eingelesen und berechnet werden. Dadurch ist die Geschwindigkeit dieser Schnittstellentechnologie als gering zu bezeichnen. Im Gegensatz zu den graphischen Schnittstellen bieten rein textbasierte Datenaustauschformate eine höhere Flexibilität und vor allem eine höhere Übertragungsgeschwindigkeit. In Bezug auf das Finite-Elemente-Programmsystem *Sofistik*, vgl. Anhang A.2, ist die dort angebotene textbasierte Programmieroberfläche (Teddy) wie folgt beschrieben: „Gerade die Urform der Systemeingabe über die CADINP-Programmierung stellt hier den offensten Zugang zur statischen Analyse dar“ ([KK12], S. V01-12).

In Abbildung 5.7 sind der im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelte und in der parametrischen Programmierumgebung Grasshopper, vgl. Anhang A.1, implementierte prinzipielle Arbeitsablauf zum Übertragen parametrischer Strukturberechnungsdaten an die FE-Berechnungssoftware *Sofistik* und der Aufbau der notwendigen Berechnungsdatei dargestellt, vgl. Anhang B. Die geometrischen Daten sowie die notwendigen Zusatzinformationen für eine statische bzw. dynamische Berechnung werden in einer Textdatei zusammengefasst, welche im dat-Format gespeichert wird. Beim Aufbau dieser Datei ist die Logik und die Programmsyntax der genutzten Berechnungssoftware anzuwenden. Im Beispiel von *Sofistik* sind neben den Systeminformationen, den Geometrieeinformationen und den Lasten auch die Berechnungsschritte und die Art der Berechnung enthalten, vgl. Abb. B.1. Somit kann mit einer solchen Datei ein parametrisches Tragwerk berechnet werden. Sofern die anzuwendende Berechnungssoftware auch Eigenwerte und Eigenformen berechnen kann, können auch diese Informationen in der Berechnungsdatei enthalten sein und berechnet werden. Ebenso können Methoden der numerischen Formfindung einbezogen werden. In diesem Fall sind entsprechende Steifigkeitsparameter vorzugeben und die Formfindung ist durch Vorspannung oder das Wirken des Eigengewichtes durchzuführen. In [HR14b] und [HR14a] ist die Verknüpfung parametrischer Geometriemodellierung hin zu parametrischen Berechnungsmodellen verdeutlicht. Die Anwendung der entwickelten Schnittstelle erstreckt sich über alle Bereiche des allgemeinen Hochbaus. So können Stabtragwerke als auch Platten-, Scheiben- und Membrantragwerke auf Basis parametrischer Grunddaten und somit in beliebiger Variation und Vielzahl berechnet werden. Die Einsatzgrenzen des Systems sind durch die Modellierungsmöglichkeiten der parametrischen CAD-Umgebung und des Berechnungsumfangs der Finite-Elemente-Software definiert. Aufgrund der textbasierten Arbeitsweise ist eine Anpassung in Bezug auf die Syntax anderer Berechnungsprogramme möglich.

Auf Basis kombinierter parametrischer CAD-Modellierungs- und Berechnungssysteme stellt die Rückübertragung der Ergebnisse eine weitere herausragende Eigenschaft zur weitergehenden Optimierung dar. Auf diese Weise können sowohl textbasierte Berechnungs-

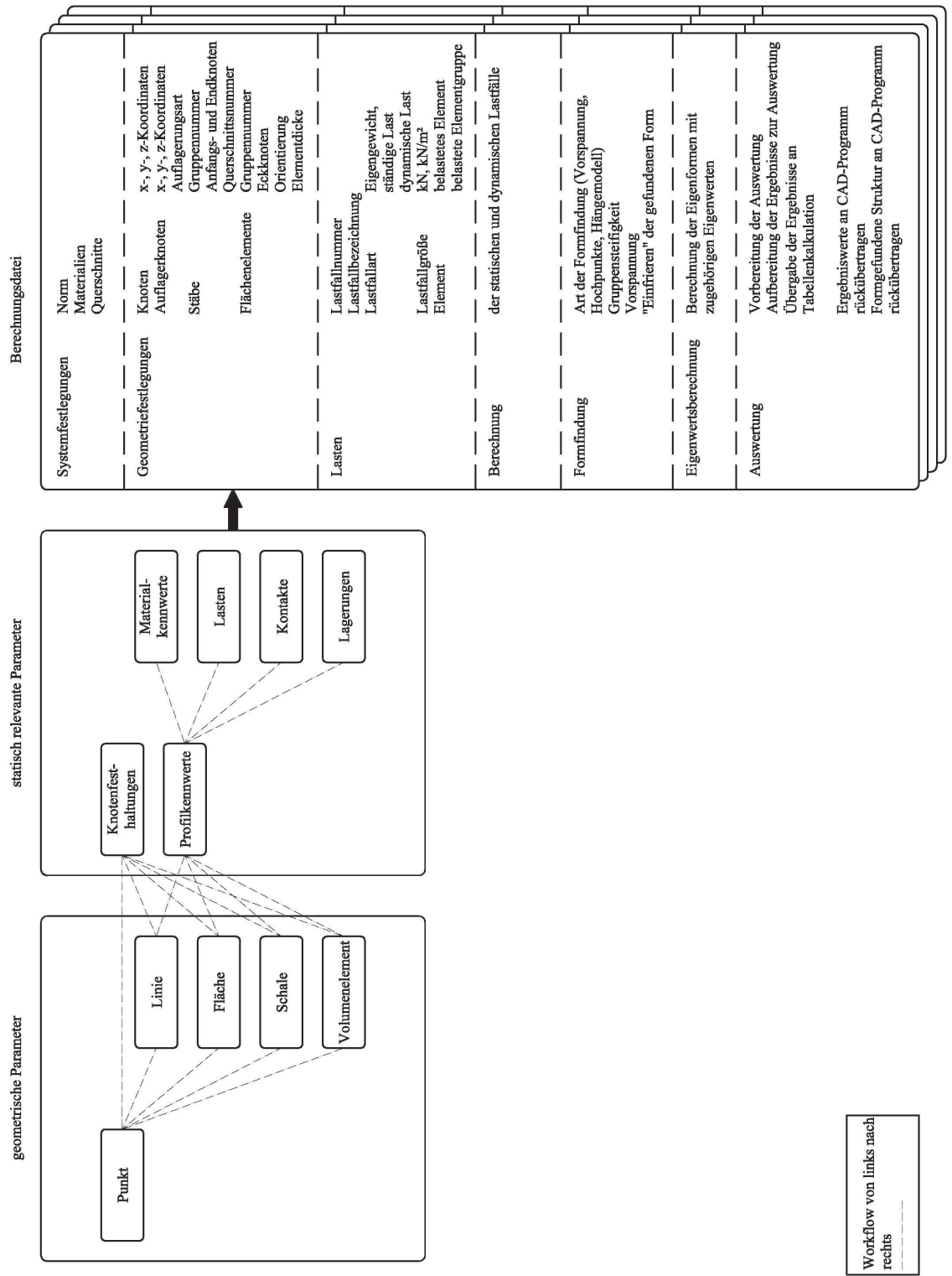


Abbildung 5.7: Schnittstelle zur Datenübertragung parametrischer CAD-Modelle an Berechnungssoftware

ergebnisse als auch berechnete Geometrien aus der Berechnungsdatenbank in die CAD-Modellierungsumgebung eingelesen werden, vgl. Abb. B.2. Speziell bei der Durchführung von Formfindungsaufgaben kann die ermittelte optimale Form versteift ('gefroren') und anschließend in die Modellierungsumgebung neu eingelesen und als neue Ausgangsform für weitere Analysen genutzt werden. Zudem können diese Formen und deren Zuschnitte auf diese Weise digitalisiert in die Herstellung übergeben werden. Der verlustfreie Datenaustausch ist aufgrund des engen Zusammenhangs zwischen Form, Vorspannzuständen, Belastungen, Materialitäten und Auflagerbedingungen vor allem bei der Realisierung von Flächentragwerken absolut notwendig. In Abhängigkeit von der Anzahl an zu berechnenden Dateien wird die Berechnung selbst als Einzel- oder Stapelverarbeitung, vgl. Abb. B.3 und B.4 durchgeführt. Die Ergebnisauswertung kann automatisiert über geeignete Tools, z. B. Visual Basic Tools oder Excel-basiert durchgeführt werden. Im Rahmen dieser Auswertung können beispielsweise maximale und minimale Eigenformen, maximale und minimale Auflagerkräfte oder Schalenschnittkräfte ermittelt werden.

Zudem können die ermittelten Spannungen und Verformungen in der CAD-Umgebung in graphischer Form dargestellt werden. Auf diese Weise kann die parametrische Modellierungsumgebung sowohl als Pre- und Postprocessor genutzt werden. Weiterführende Programme sind auf diese Weise nicht notwendig. Neben der Ermittlung der maximalen und minimalen Ergebniswerte in Textform besteht auch die Möglichkeit, diese Werte in den jeweiligen Modellen im CAD-Programm darzustellen und somit einen direkten Bezug zwischen Ergebnis und zugehöriger Struktur zu haben, vgl. Anhang B. Hierzu gehört auch eine grafische Darstellung der Zuschnittflächen von formgefundenen Membrantragwerken.

In Abbildung 5.8 ist die Funktionsweise des entwickelten parametrischen Optimierungsmodells prinzipiell dargestellt.

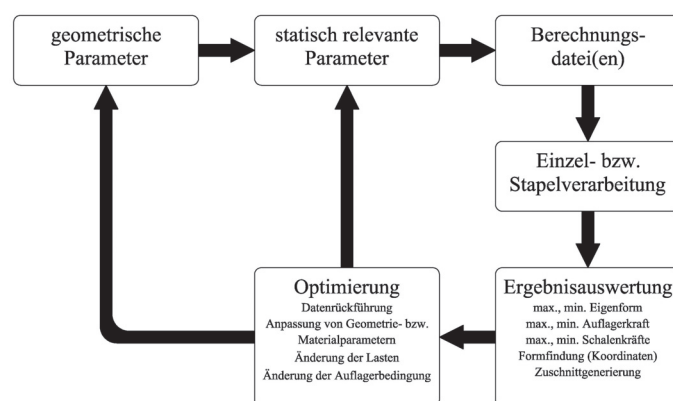


Abbildung 5.8: Datenübertragung zwischen Modellierungs- und Berechnungssoftware

Die hier vorgestellte Schnittstellentechnologie mit einer Anbindung an ein kommerzielles FE-System (z. B. *Sofistik*) bietet im Gegensatz zu den in Grasshopper implementierten Analysetools *Karamba* von Clemens Preisinger, vgl. Anhang A.1, und *Kangaroo* von Daniel Piker die Möglichkeit der Bearbeitung im Wettbewerbsbereich aber auch in allen folgen-

den Planungsschritten, wobei kein Wechsel zu einer anderen Software notwendig wird. Die Berechnung selbst wird im Fall der Anwendung von *Sofistik* aus der parametrischen Modellierungsumgebung ausgelagert, da die *Sofistik*-eigenen Berechnungskerne verwendet werden. Die Übertragung erfolgt über batch-Befehle. Die Auslagerung der Berechnung ist zwar zeitaufwändiger als interne Berechnungsvorgänge, bietet jedoch verschiedene Vorteile. So können vor allem die ständig weiterentwickelten und gewarteten Berechnungsalgorithmen von *Sofistik* verwendet werden. Ebenso können auch die von *Sofistik* angebotenen Ausgabeformate verwendet werden. Dies ist im Hinblick auf prüffähige statische Berechnungen, deren erwarteten Umfang und optischen Eindruck von großem Interesse für baupraktische Anwendungen.

Als beispielhafte Anwendung der Schnittstellentechnologie wird das in Abb. 5.3 dargestellte Sonnenhaus des Sokrates vergleichend hinsichtlich einer optimalen Tragwerksform analysiert. Basierend auf einem parametrischen Geometriemodell wird das FE-Berechnungsmodell erstellt. Auf Basis einer identischen Reglementierung hinsichtlich möglicher Knotenverschiebungen ergibt sich im Gegensatz zur Tageslichtanalyse, Abb. 5.5, infolge der statischen Analyse eine grundlegend andere Geometrieform, vgl. Abb. 5.9. Als Zielfunktion wird $\min f(x)$ definiert, wobei $f(x)$ die maximale vertikale Verformung im System repräsentiert. Hierbei wird deutlich, dass das Objekt zu einer Verringerung der Öffnungsbreite und -höhe tendiert. Sowohl die Ergebnisse der Tageslichtanalyse als auch der statischen Analyse stellen für die jeweiligen Einzelaspekte optimale Lösungen dar. So 'öffnet' sich das Sonnenhaus des Sokrates und ermöglicht somit Eintragung der flach stehenden Wintersonne, verhindert aber gleichzeitig den Licht- und Wärmeeintrag im Sommerhalbjahr. Demgegenüber 'schließt' sich das Untersuchungsobjekt, da dies zu einer Reduzierung der Knicklänge der Wand als auch der Spannweite im Dachbereich führt. An diesem Beispiel wird deutlich, wie wichtig ganzheitliche Analysen für die Optimierung von Trag-, vor allem aber auch von allgemeinen Bauwerken sind. Im Besonderen wird hier auf die Definition der notwendigen Zielfunktionen multikriterieller Optimierung hingewiesen, vgl. Abschnitt 3.5.

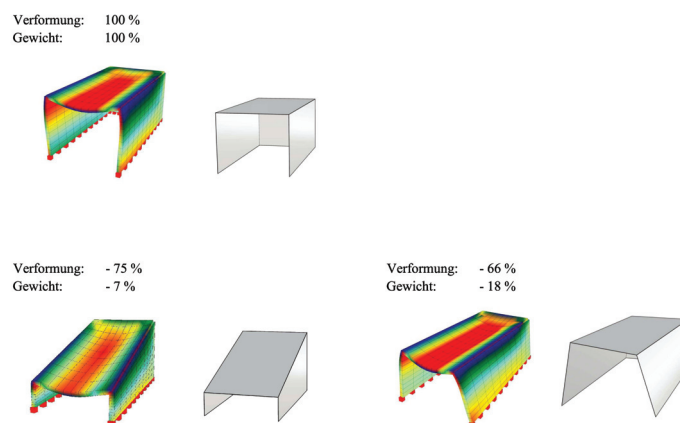


Abbildung 5.9: Sonnenhaus des Sokrates — Auswertung der statischen Berechnung und Optimierung

5.1.4 Parametrische Modelle zur Lebenszyklusanalyse von Tragwerken

In den vorangegangenen Abschnitten werden die Möglichkeiten der Anwendung parametrischer Modelle und ihre Erweiterungsmöglichkeiten hin zu Analysemodellen verdeutlicht. Es kann aber auch gezeigt werden, dass die Optimierungsergebnisse immer vor dem Hintergrund der gewählten Zielfunktionen zu prüfen sind. Bei der Bewertung von Tragstrukturen sind neben der Erfüllung der einzelnen Kriterien, wie beispielsweise die Einhaltung der Tragfähigkeits- und Gebrauchstauglichkeitskriterien, auch die ganzheitlichen Aufwendungen hinsichtlich Erstellung, Betrieb und Rückbau zu evaluieren. Hierbei kommen vermehrt Lebenszyklusanalysen (Life Cycle Assessment) zum Einsatz, vgl. Kapitel 4, [HHR⁺14b], [HHR14a]. Die Nachhaltigkeitsanalysen sind aufgrund ihrer Relevanz sehr früh im Entwurfsprozess zu verankern, da hierbei die größten Effekte in Bezug auf die Planung erzielt werden können [KJZ14; Ste97; HFSZ07; HHR14a; HHR⁺14b].

Heidenreich et al. [HHR14a] und Hollberg et al. [HHR⁺14b] verdeutlichen die Vorgehensweise einer gekoppelten statischen und ökologischen Bauteilanalyse in Form einer geschlossenen Prozesskette auf Basis der parametrischen Modellentwicklung, vgl. Abbildung 5.10.

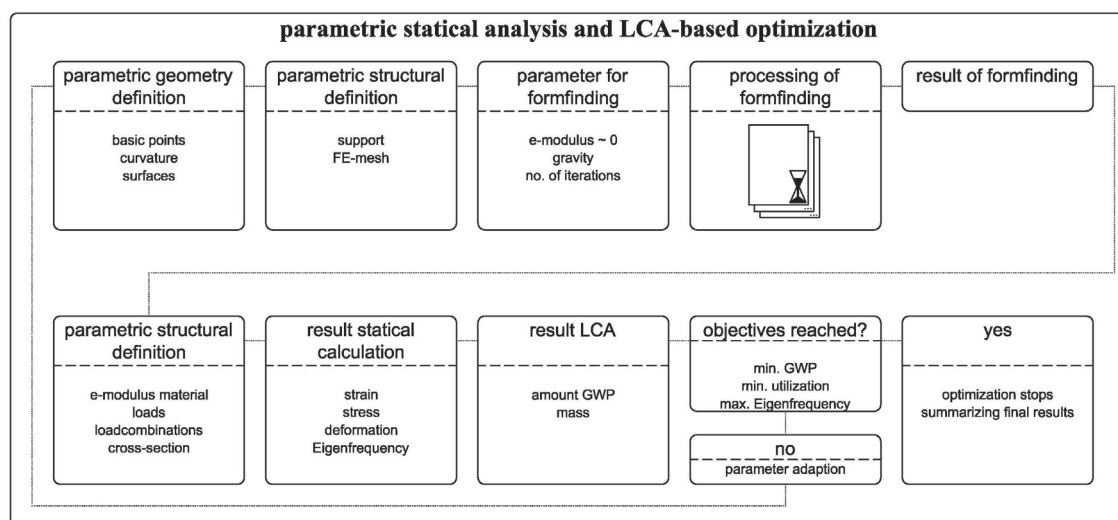


Abbildung 5.10: parametrische Lebenszyklusoptimierung nach Heidenreich et al. [HHR14a]

Die parametrische Lebenszyklusanalyse von Tragwerken beruht hierbei auf den infolge der statischen bzw. dynamischen Berechnung ermittelten Querschnitts- und Materialkennwerten. Hierzu sind die Massen sämtlicher Bauteile auf Basis der Abmessungen (Länge x Breite x Höhe) und der Materialeigenschaften (Dichte) zu ermitteln. Diese Massen sind zusätzlich mit den Umweltindikatoren, vgl. Abschnitt 4.1, zu belegen. Aufgrund der Vielzahl unterschiedlich verfügbarer Indikatoren (GWP, PEI usw.) sind für die jeweils zu betrachtende Planungsaufgabe die maßgebenden Indikatoren zu verwenden. Die Datenbasis der Umweltwirkungsfaktoren muss hierzu so aufbereitet sein, dass eine Verknüpfung mit dem Berechnungs- und Optimierungsmodell möglich ist. Sinnvoll erscheinen in diesem

Zusammenhang textbasierte Datengrundlagen.

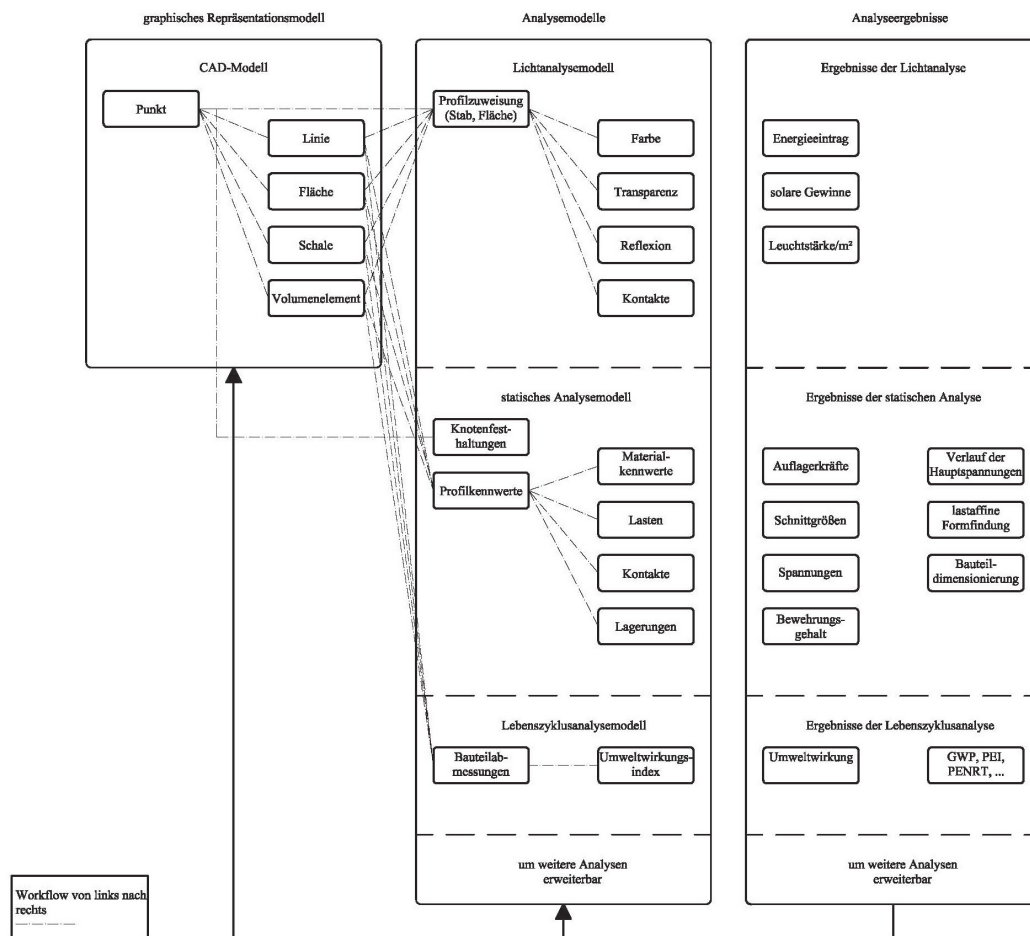


Abbildung 5.11: Lebenszyklusanalysemodell auf Basis parametrischer Geometriemodellierung

Die Berechnung der ökologischen Umweltwirkung erfolgt hierbei zunächst bauteilbasiert, da unterschiedliche Bauteile unter Verwendung verschiedenartiger Materialien differenziert zu betrachten sind. Im Anschluss wird die Gesamtbilanz der Konstruktion durch Addition aller ökologischen Massen der Einzelbauteile ermittelt. Der parametrische Ansatz ermöglicht hierbei die Untersuchung einer Vielzahl an Varianten wobei unterschiedliche Materialien, Materialfestigkeiten, Bauteilstärken und Geometrieformen Berücksichtigung finden können. An dieser Vielzahl ist erkennbar, dass diese Untersuchungsaufgabe kein triviales Ergebnis darstellt und die Gesamtergebnisse entsprechend zu werten sind. Vor allem sei auf die Möglichkeiten der kontinuierlichen Optimierung mittels evolutionärer Algorithmen verwiesen, vgl. Abschnitt 3.5. Somit kann eine umfangreiche Analyse einer Vielzahl an Varianten erfolgen und eine Verringerung der Materialaufwendungen für die Konstruktion erzielt werden.

Heidenreich et al. [HHR14a] und Hollberg et al. [HHR⁺14b] wenden die entwickelte parametrische Lebenszyklusanalyse von Tragwerken für die Betrachtung von Stahlbetonschalen-

und Stahlbetondeckenkonstruktionen an. Hierbei können signifikante Materialeinspareffekte ermittelt werden.

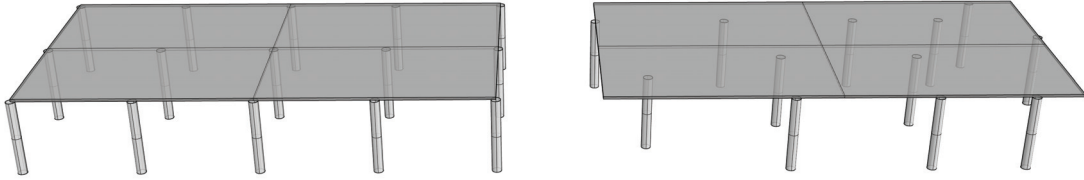


Abbildung 5.12: Deckenplattenoptimierung nach Hollberg et al. [HHR⁺14b]

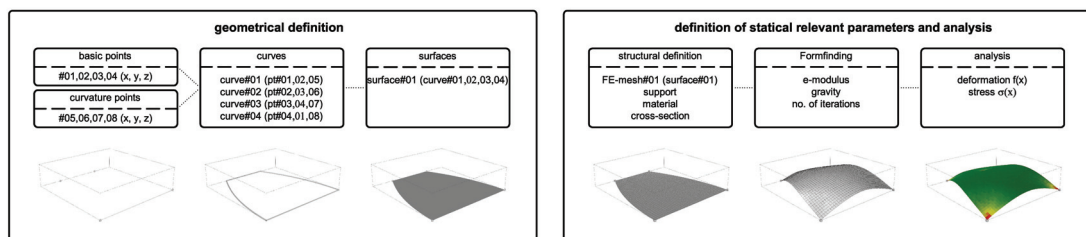


Abbildung 5.13: Schalenoptimierung nach Heidenreich et al. [HHR14a]

5.1.5 Parametrische Modelle zur Analyse adaptiver Tragwerke

In Abschnitt 5.1.3 werden die Möglichkeiten parametrischer statischer Analysen und der zugehörigen Modelle erläutert. Dabei werden parametrische Geometriemodelle so erweitert, dass sie direkt zu statischen bzw. dynamischen Analysen in Verbindung mit Finite-Elemente-Software genutzt werden können. Diese Vorgehensweise ermöglicht die Untersuchung einer Vielzahl an Strukturvarianten, vgl. [HR14b; HR14a]. Somit können geometrische Anpassungen im Planungsprozess ohne umfangreiche Neumodellierungen analysiert werden. Neben der Berücksichtigung geometrischer Veränderungen können unterschiedliche Materialeigenschaften berücksichtigt werden. Es besteht somit die Möglichkeit eine Vielzahl variabler Parameter und Tragwerkszustände zu berücksichtigen und zu analysieren. Diese Herangehensweise eröffnet auch vielfältige Möglichkeiten zur Untersuchung und Auslegung adaptiver Tragwerke.

Die zuvor beschriebene Vielfalt der Szenarien infolge Form- und Eigenschaftsveränderlichkeiten ist durch Anwendung parametrischer Methoden hervorragend umzusetzen. Hierzu können die parametrischen Ansätze der statischen Analysemethoden, vgl. Abschnitt 5.1.3, durch entsprechende Erweiterung genutzt werden. Es können geeignete Bereiche im Tragwerk zur Einbringung von Aktoren und Sensoren ermittelt werden. Des Weiteren können durch die Variation der Materialkennwerte und der simultanen Ergebnisauswertung wichtige Kennwerte für die Auslegung der aktorischen Eigenschaften ermittelt werden. Durch Gegenüberstellung der ermittelten erforderlichen Bauteil- und Materialeigenschaften mit den Möglichkeiten der verfügbaren Smart Materials, vgl. Abschnitt 2.2.2, können Aussagen bezüglich anzuwendender Materialien getroffen werden. In den nachfolgenden Abschnitten werden die Struktogramme und grundlegenden Methoden der parametrischen Strukturanalyse adaptiver Tragwerke erläutert. Hierbei wird hinsichtlich aktorischer und sensorischer Bauteileigenschaften unterschieden, wobei diese Unterteilung nur in Bezug auf die grundlegende Anordnung im Tragwerk zu verstehen ist und im 'richtigen' Tragwerk sowohl Sensoren als auch Aktoren gleichzeitig zum Einsatz kommen. Die nachfolgend gezeigten Methoden basieren auf entwickelten Schnittstellen zwischen CAD- und Finite-Elemente-Modellen, welche die Anwendungs- und Untersuchungsmöglichkeiten adaptiver Tragwerke deutlich erweitern.

Die Ablaufdiagramme für parametrische statische Analysemodelle, vgl. Abschnitt 5.1.3, werden für die Analyse adaptiver Systeme entsprechend erweitert. In Abbildung 5.14 ist die grundsätzliche Behandlung adaptiver Betrachtungen verdeutlicht. Die Analyseergebnisse können in Bezug auf die Einhaltung zulässiger Spannungen und Verformungen geprüft werden. Sollte ein Grenzwert überschritten sein, können entsprechende adaptive Anpassungen vollzogen werden. Diese Vorgehensweise reflektiert die unterschiedlichen Ansätze der Nutzung adaptiver Strukturen.

Adaptive Systeme werden auf der einen Seite für gewollte Formänderungen, z. B. für Verschattungssysteme genutzt. Auf der anderen Seite werden Strukturertüchtigungsmaßnahmen, wie z. B. Schwingungs- und Verformungsreduzierungen erzielt. Bei der gewollten Formänder-

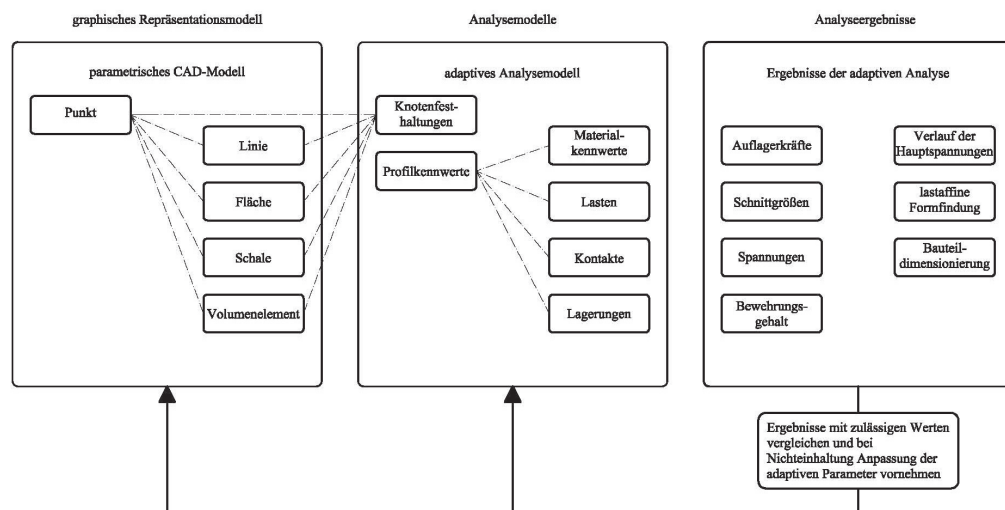


Abbildung 5.14: Analysemodell der Betrachtung adaptiver Strukturen für statische Berechnungen

ung wird die Geometrie in zuvor definierten Grenzen verändert, vgl. Abbildung 5.15. In diesem Beispiel wird eine adaptive Fassadenlamellenkonstruktion verdeutlicht. Hierbei werden Fassadenlamellen in Abhängigkeit vom Sonnenstand in ihrer Ausrichtung variiert. Die daraus resultierenden Formen bedürfen einer Analyse der auftretenden Spannungen und Verformungen. So variieren z. B. die Windkräfte in Abhängigkeit des Neigungswinkels der Lamellen bei Fassadenkonstruktionen. Diese Formänderungen können auf unterschiedliche Art und Weise erzeugt werden. So können z. B. Stellmotoren in Form einer Auflagerverschiebung, vgl. Abbildung 5.16, oder materialintegrierte eigenschaftsveränderliche Smart Materials zum Einsatz kommen, vgl. Abbildung 5.17.



Abbildung 5.15: Formveränderliche Fassadenlamellen

Die Untersuchung adaptiver Systeme hinsichtlich der Strukturstabilisierung bzw. -ertüchtigung infolge von Lasten, z. T. dynamische Lasten, erfordert ebenso eine genaue Analyse der auftretenden Spannungen und Verformungen. Auch hierbei kann die Ertüchtigungsmaßnahme durch eine Auflageradaption oder durch eine strukturinterne Adaption (Steifigkeitsadaption) erfolgen. Diese unterschiedlichen Ansätze verdeutlichen, wie notwendig eine enge Verbindung zwischen Geometriemodell und statischer Analyse bei diesen Betrachtungen ist.

Die Möglichkeiten der Optimierung von Schalentragsystemen mittels Auflageradaption werden in Neuhäuser [Neu14] beschrieben. Hierbei werden einzelne Auflager einer punktge-

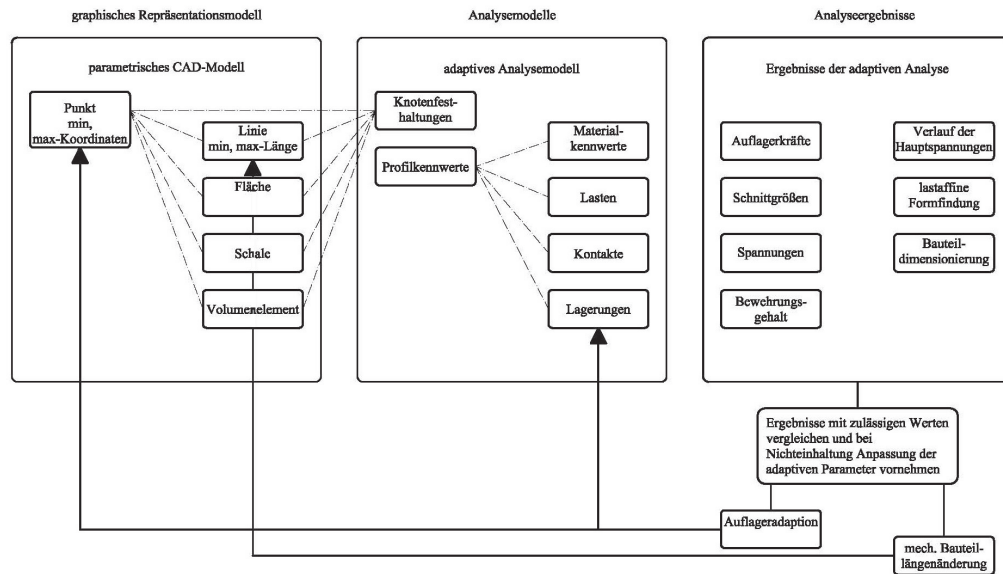


Abbildung 5.16: Analysemodell der Betrachtung adaptiver Strukturen für statische Berechnungen — Spezialfall Auflager- und Bauteillängenadaptation

lagerten Schale verschoben und dabei die „Homogenisierung der Spannungsfelder und die Minimierung der bemessungsrelevanten Maximalspannungen“ ([Neu14], S. V) verfolgt. Es kann gezeigt werden, dass diese punktuellen Eingriffe in das Tragwerk positive Auswirkungen auf das Gesamttragverhalten nach sich ziehen. Die in Abbildung 5.16 verdeutlichte Strukturadaptation infolge Bauteillängenänderung wird in Teuffel [Teu04] ebenfalls unter Nutzung längenveränderlicher Bauteile zur Reduzierung von Verformungszuständen genutzt.

Die in Abbildung 5.17 verdeutlichte Behandlung steifigkeitsvariabler Systeme ermöglicht die Umsetzung des Konzeptes nach Teuffel [Teu04], wobei eine Spannungs- oder Verformungsreduzierung durch Variation des Elastizitätsmoduls entsprechend smarter Materialien hervorgerufen wird. Nach Teuffel kann die erforderliche Materialsteifigkeit von Fachwerkstäben für die einzelnen Elemente i und die betrachteten Lastfälle k entsprechend nachfolgender Formel ermittelt werden.

$$E_{ik} = \frac{N_{ki}^{opt}}{\epsilon_{ik}^r * A_i} = \frac{\sigma_{ik}}{\epsilon_{ik}^r} \quad (5.1)$$

Neben den zuvor aufgezeigten Anwendungsmöglichkeiten smarter Materialien zur adaptiven Unterstützung linearer Tragstrukturen, wie z. B. Fachwerkstrukturen, vgl. Teuffel [Teu04], können diese Anwendungen auch auf flächige Bauteile, wie z. B. Schalentragwerke übertragen werden, vgl. Weilandt [Wei08]. Nach Weilandt [Wei08] können Flächentragwerke auf drei Wegen aktorisch aktiviert werden. So können dehnungs- bzw. steifigkeitsaktivierte Flächentragwerke ausgebildet werden. Des Weiteren kann die aktorische Wirkung durch integrierte, diskrete Dehnungs- bzw. Steifigkeitsaktoren oder über die Aktorenausbildung an den Rändern der Tragwerke erzielt werden. Die Anwendung dieser Aktoren kann nach

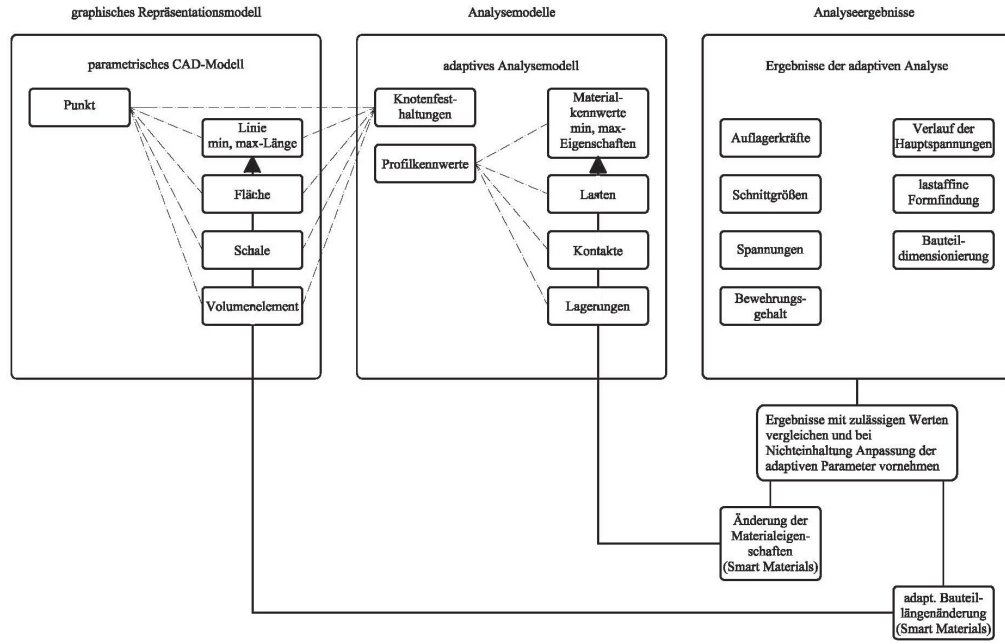


Abbildung 5.17: Analysemodell der Betrachtung adaptiver Strukturen für statische Berechnungen — Spezialfall: Berücksichtigung adaptiver Materialparameter

Weilandt ([Wei08], S. 7) „als Pflaster auf die Tragwerke aufgebracht oder mittels integrierter aktiver Fasern abgebildet werden.“ Weiterhin verdeutlicht Weilandt, dass diese Aktoren schon im eingebauten, nicht aktivierten Zustand den Beanspruchungszustand beeinflussen. Durch die fortfolgende Aktivierung erfolgt eine Entlastung der Struktur, indem die induzierten Dehnungen weitere Beanspruchungen anziehen und auf diese Weise das Tragverhalten homogenisieren. Die Ansätze von Weilandt beziehen sich auf flächig verteilte Aktoren. Dennoch weist Weilandt darauf hin, dass die ermittelten Werte auf Faseraktoren umgerechnet werden können. Hierzu sind die ermittelten Dicken der Aktoren „entsprechend dem gewählten Faserabstand in einen Faserdurchmesser“ ([Wei08], S. 87) umzurechnen.

$$h_{\text{aktuator}} = \frac{\delta_{\text{aktiv}} * E_{\text{sch}} * E_{\text{aktuator}} * h_{\text{pfl}}^{\text{nichtaktiv}} + \sigma_{\text{aktuator,adapt}} * E_{\text{sch}} * h_{\text{pfl}}^{\text{nichtaktiv}}}{E_{\text{aktuator}} * \sigma_{\text{aktuator,adapt}}} \quad (5.2)$$

Diese Aktorenanwendung scheint im Hinblick auf die Untersuchung und Anwendung von Faserverbundstrukturen am geeignetsten. Die in der Literatur veröffentlichten Untersuchungen hinsichtlich der numerischen Analyse adaptiver Strukturen im Bauwesen fokussieren zumeist isolierte Aufgabenstellungen. Eine Zusammenfassung hierzu liefert Weilandt in [Wei08]. Die vorliegende Arbeit bietet demgegenüber die Verbindung von Formoptimierung, optimaler Aktoren- und Sensorpositionierung und Bauteilauslegung. Die zuvor aufgestellten Struktogramme, vgl. Abbildung 5.16 und 5.17, bieten die Möglichkeit diese Vorgehensweise abzubilden und parametrisch eine Vielzahl unterschiedlicher Systeme zu untersuchen. In Abbildung 5.18 ist eine Freiformschale verdeutlicht, welche exemplarisch

mit variabler Lastanordnung beaufschlagt ist. Die Analyse derartiger Systeme und die Auslegung hinsichtlich einer optimaler Positionierung der Aktoren aber auch der kritischen Untersuchung konventioneller Bauteilverstärkungen kann mit Hilfe dieser Vorgehensweise abgedeckt werden.

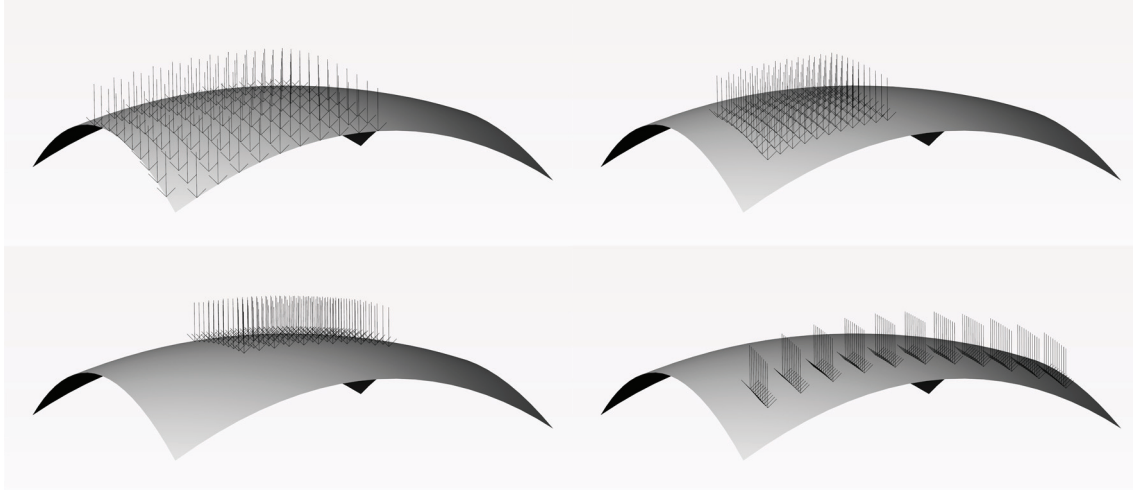


Abbildung 5.18: parametrische Schalenkonstruktion mit variabler Lastanordnung

Heidenreich und Ruth verdeutlichen in [HR14b] die Anwendung parametrischer adaptiver Freiformflächentragwerke auf Basis von Faserverbundstrukturen. Hierbei kommen die in Abschnitt 3.4.4 dargelegten Faserorientierungsalgorithmen zum Einsatz. Auf diese Weise können die Hauptspannungsrichtungen und die korrespondierende Faseranordnung ermittelt werden, vgl. Abbildung 5.20. Die weitere Analyse einer adaptiven Freiformfaserverbundschalenstruktur ist im nachfolgenden Kapitel 6 zusammenfassend beschrieben.

Für die Einschätzung, Bewertung und Überwachung von leichten adaptiven Schalenstrukturen ist neben der optimalen Positionierung von Aktoren die Integration von Sensoren von Interesse. Bei der Instrumentierung der Tragwerke können unterschiedliche Sensortypen zum Einsatz kommen. Die am weitesten verbreiteten Sensoren sind Dehnmessstreifen. Des Weiteren können auch optische bzw. piezoelektrische Sensoren eingesetzt werden. Die Anwendungsmöglichkeiten der piezoelektrischen Sensoren basieren auf dem inversen piezoelektrischen Effekt, vgl. Abschnitt 2.2.4. Optische bzw. auch faseroptische Sensoren können vielfältige Belastungen infolge veränderter optischer Eigenschaften registrieren, vgl. Ruth et al. [RGH12]. Diese Messungen beruhen auf Laufzeitmessungen von Lichtimpulsen. Hierbei können über Laufzeitunterschiede Verformungen, Druckbelastungen oder Temperaturänderungen registriert werden. Die Optimierung der Sensoranordnung ermöglicht einen ressourcenschonenden Einsatz dieser speziellen Bauteile. Zudem ermöglicht der sensitive Einsatz der Sensoren, dass das Monitoringsystem nicht zu komplex dimensioniert werden muss. Dennoch fasst Teuffel [Teu04] die Anwendung von Sensoren wie folgt zusammen. Es sei „nicht sinnvoll, das Optimierungspotenzial der Adaptivität durch die Anzahl der Sensoren einzuschränken“ ([Teu04], S. 43), da diese hoch entwickelt sind und im Vergleich zu den Aktoren sehr günstig erworben werden können. Entsprechend der nachfolgenden Abbildung 5.19 kann die optimale Einbaulage sensorischer Bauteile ermittelt werden. Hier-

bei kann die optimale Einbaulage ermittelt werden. Die Ermittlung einer geeigneten Lage von Sensoren kann auch über die „Auswertung der dominanten Eigenmoden des Modells“ ([BFF11], S. 46) erfolgen.

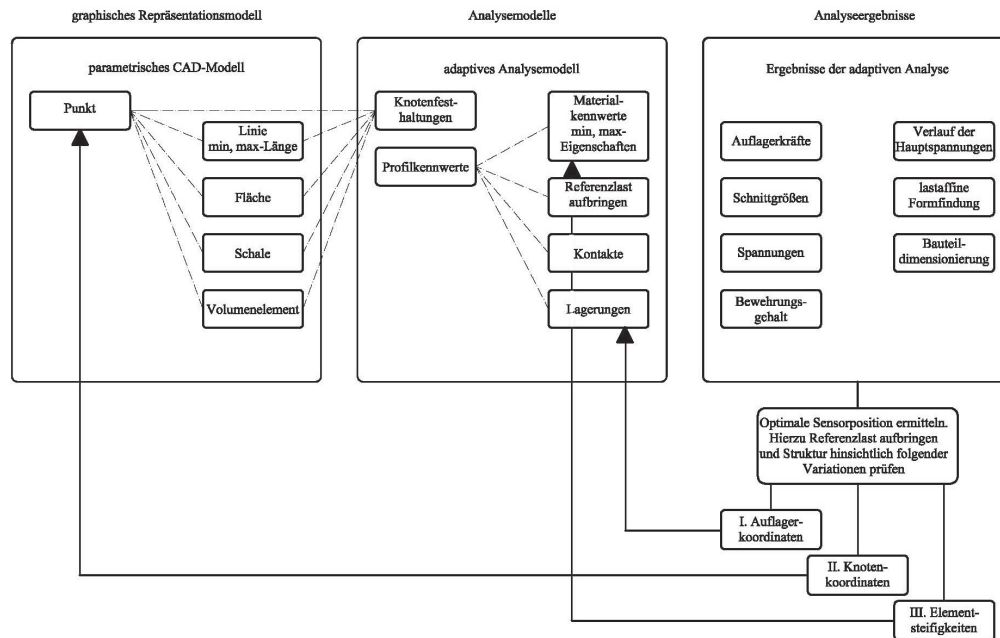


Abbildung 5.19: Analysemodell der Betrachtung adaptiver Strukturen für statische Berechnungen — Spezialfall: Sensoranordnung

5.2 Fazit

Anhand der vorangegangenen Abschnitte kann gezeigt werden, dass auf Basis eines einheitlichen parametrischen Geometriemodells unterschiedliche Analyseformen aufgebaut werden können. So wird am Beispiel des Sonnenhauses des Sokrates eine Tageslichtanalyse und eine Optimierung im Hinblick auf ein optimales Tragwerk durchgeführt. Hierzu wird das Geometriemodell um die jeweils notwendigen Parameter erweitert, also mit Wissen angereichert und mit geeigneten Analysetools berechnet. Zur Ansteuerung der Berechnungssoftware sind geeignete Schnittstellen unumgänglich. Hierbei ist sowohl auf den Datenexport wie auch auf den Re-Import Wert zu legen. Vor allem das Einlesen der Berechnungs- und Formfindungsergebnisse in Form von angepassten Geometriedaten ermöglicht die Anpassung der Ausgangsgeometriestruktur. Dies ist zwingend notwendig, damit eine aufwändige Neumodellierung nach jedem Rechenschritt umgangen werden kann. Dieser Fakt gewinnt an Bedeutung, wenn verschiedene Optimierungen parallel vollzogen werden sollen. Im vorliegenden Beispiel wird sehr deutlich ersichtlich, dass unterschiedliche Betrachtungen grundlegend andere Ergebnisse nach sich ziehen können. So „öffnet“ sich das Gebäude zur Wintersonne, um maximale Energieeinträge erzielen zu können, vgl. Abbildung 5.5, „duckt“ sich aber gleichzeitig „weg“, um die Verformungen minimieren zu können, vgl. Abbildung 5.9. Daran wird die Wichtung unterschiedlicher

Zielfunktionen im Rahmen einer multikriteriellen Optimierung sehr deutlich. Die Zielfunktionen und Abbruchkriterien müssen sehr ausgewogen gewählt und vor allem analysiert werden. Eine genaue Ergebnisauswertung durch den Nutzer ist trotz aller Automatisierung und technischer Möglichkeiten unumgänglich. Die Anwendung parametrischer Modelle ermöglicht des Weiteren die Integration von Lebenszyklusbetrachtungen in den Optimierungsprozess statischer Bauteile. Auf diese Weise können frühzeitig notwendige Aussagen hinsichtlich nachhaltiger Tragwerke getroffen werden. Jedoch sind bei derartigen kombinierten Optimierungsansätzen den Datengrundlagen wie Lebenszykluskennwerten, Belastungen usw. eine hohe Aufmerksamkeit zu widmen.

Die Anwendung parametrischer Methoden kann des Weiteren für die Analyse und Auslegung adaptiver Tragwerke eingesetzt werden. Die erstellten Ablaufdiagramme der parametrischen statischen Analyse können hinsichtlich der adaptiven Bauteil- und Materialeigenschaften erweitert werden. Zudem können verschiedene Effekte genutzt werden. So können auch die „formgebenden Parameter der Formfindungsmethode ... als formkontrollierende Parameter bei aktiv geregelten Strukturen“ Anwendung finden ([BFF11], S. 46).

Nach Herleitung der parametrischen Modellbildung (parametrisches Modell) wird im nachfolgenden Kapitel die Analyse der einzelnen Tragwerkszustände adaptiver Tragwerke am Beispiel einer Freiformschale auf Basis der entwickelten ganzheitlichen Entwurfsmethode erörtert.

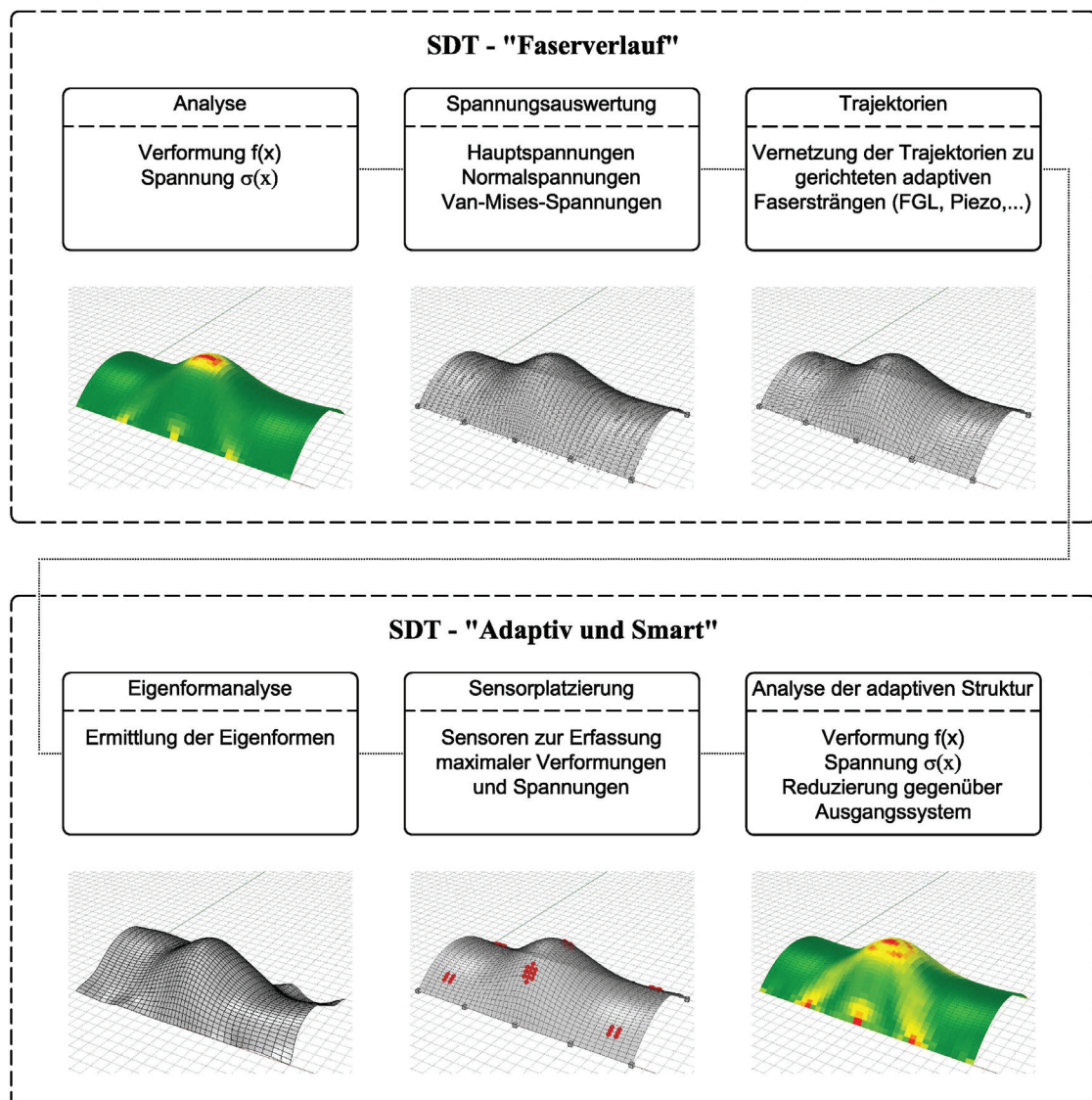


Abbildung 5.20: Analyse der Membranspannungen und Faserorientierung einer Schalenstruktur [HR14b]

6 Adaptive

Faserverbundschalentragwerke

6.1 Allgemeines

In Abschnitt 5.1.5 werden die vorteilhaften Eigenschaften parametrischer Modelle zur Analyse von adaptiven Tragwerken erläutert. Durch die Integration von Aktoren und Sensoren können Tragwerke und Bauteile hinsichtlich ihres Tragverhaltens positiv beeinflusst werden. Die aktive Tragwerkssteuerung ermöglicht eine Anpassung der Steifigkeit simultan zu auftretenden Belastungen. Auf diese Weise können Tragwerke materialsparender ausgeführt werden. Die Anpassung der Systemsteifigkeit muss vor dem Hintergrund der Ausführbarkeit kritisch betrachtet werden. In der vorliegenden Arbeit wird eine Vorgehensweise zur gesamtenergetischen Bilanzierung in Bezug auf Erstellung und adaptive Steuerung von Faserverbundstrukturen vorgestellt. Das Tragverhalten adaptiver Tragwerke kann hierbei jeweils hinsichtlich eines passiven, aktivierten und adaptiven Zustandes charakterisiert werden [Wei09; Lem09]. Der passive Zustand beschreibt das Trag- und Strukturverhalten infolge äußerer Lasten — ohne Manipulation. Der aktivierte Zustand beschreibt einen theoretischen Zustand, wobei nur die Aktoren aktiv sind. Hierbei wird die Strukturantwort ermittelt. Der adaptive Tragwerkszustand beschreibt die Superposition eines linear-elastischen Ansatzes infolge der Superposition aus passivem und aktivem Zustand.

In den nachfolgenden Abschnitten werden am Beispiel einer parametrischen Freiformschale die notwendigen Berechnungs- und Arbeitsschritte verdeutlicht. Hierzu werden die betrachtete Geometrie, die zugrunde liegenden Materialkennwerte, die Belastungen und die Herleitung der Optimierungsaufgabe eingehend beschrieben. Die Betrachtung hinsichtlich der Herstellung findet im Rahmen der Untersuchung keine Anwendung und ist in der weitergehenden Betrachtung durchzuführen.

6.2 Formulierung der Optimierungsaspekte

Die in Abb. 6.1 dargestellte Schalenstruktur soll auf Basis des parametrischen Optimierungsmodells unter Berücksichtigung adaptiver Trageigenschaften optimiert werden. Die Formulierung der Optimierungsaufgabe entsprechend der aufzustellenden Fragestellung (Zielfunktion) ist somit genau festzulegen und zu definieren. Die parametrische Gesamtstruktur ermöglicht die Erzeugung einer Vielzahl möglicher Strukturvarianten. Nur

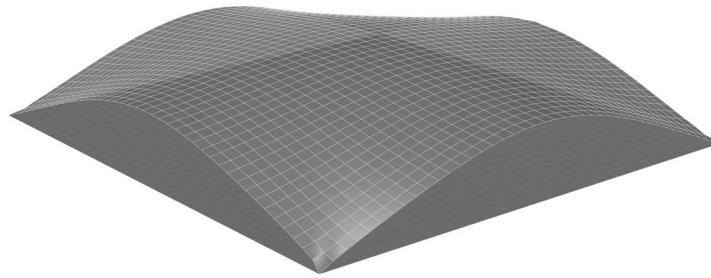


Abbildung 6.1: Freiformschalenentwicklung mittels Hängeform

durch die Definition einer geeigneten Optimierungsaufgabe und zugehörigen Zielfunktion kann nach Coelho et al. [CEPR14] der Optimierungsprozess so gesteuert werden, dass belastbare Aussagen zur Struktur getroffen werden können. Die Definition relevanter Aspekte bezüglich der Optimierung aus statischer/tragwerksplanerischer und ganzheitlicher/ökologischer Sicht wird nachfolgend dargelegt.

6.2.1 Aspekte zur statischen Schalenoptimierung

Basierend auf den allgemeinen Ausführungen zur Optimierung von Schalentragwerken, vgl. Abschnitt 3.3, werden für die vorliegende Faserverbundschalenstruktur nachfolgend geeignete Optimierungsaspekte hergeleitet. Die Optimierung einer Struktur hinsichtlich statisch relevanter Gesichtspunkte basiert im Wesentlichen auf Strukturreaktionen infolge äußerer Einwirkungen (Lasten). Hierzu zählen Verformungen, Dehnungen, Spannungen und die Dehnungsenergie. Nach Pugnale et al. [PES14] zeigen steife Strukturen ein geringes Verformungsverhalten und geringe Dehnungen, wohingegen massive Strukturen geringe Spannungen aufweisen. Beide Strukturtypen zeigen aber geringe Werte bei der Dehnungsenergie. Die Verformungen sind dabei über ein Vektorfeld, Spannungen über ein Tensorfeld beschrieben. Die Dehnungsenergie wird demgegenüber als skalare Größe über die Gesamtstruktur integriert [PES14]. Die zuvor benannten steifigkeitsbeschreibenden Strukturkennwerte können für die Optimierung herangezogen werden. Es ist allerdings darauf hinzuweisen, dass aufgrund ihrer Unterschiede im Rahmen des Optimierungsprozesses unterschiedliche 'Optima' ermittelt werden können. Somit erfolgt die Optimierung von Schalentragwerken aus mechanisch-theoretischer Sicht häufig hinsichtlich der Minimierung der Nachgiebigkeit (*compliance*). Lemaitre ([Lem09], S. 11) charakterisiert die Nachgiebigkeit als „einen Messwert für die Steifigkeit der Struktur.“ Nach Lochner-Aldinger und Schumacher [LAS14] wird die minimale Nachgiebigkeit als Integral über das Produkt der Randspannungen und der zugehörigen Verschiebungen beschrieben. Die Berechnung kann basierend auf dem Prinzip der Minimierung der totalen potenziellen Energie, $\Pi = U - W$, berechnet werden. Nach Lochner-Aldinger und Schumacher [LAS14] werden die interne

Energie U und die externe Energie W wie folgt berechnet.

$$U = \int_{\Omega} \epsilon^T C \epsilon d\Omega \quad (6.1)$$

$$W = \int_{T_N} v^T t_{(T_N)} d\Gamma_N - \int_{T_D} v_{(T_D)}^T [\sigma] n d\Sigma_D + \int_{\Omega} v^T f d\Omega \quad (6.2)$$

Weitere Ansätze zur Schalenoptimierung stellen hierbei die Betrachtung jeweils der Dehnungsenergie bzw. des Spannungsausgleiches dar. Auf diese Weise können hauptsächlich auf Zug bzw. auf Druck belastete Tragwerke erzeugt werden, vgl. Formel 6.3. Anhand von Formel 6.4 können hauptsächlich auf Druck belastete Tragwerksformen ermittelt werden. Hierbei stellt σ die elementbasierte Spannung und σ_a die Grenzspannung des Materials dar.

$$f_E = \frac{1}{2} \int_V \sigma \epsilon dV \quad (6.3)$$

$$f_s = \int_V (\sigma - \sigma_a)^2 dV \quad (6.4)$$

Im Rahmen der Strukturoptimierung können auch die Kriterien der maximalen vertikalen wie auch horizontalen Verformung Berücksichtigung finden. Die Optimierung selber kann hierbei durch die Integration evolutionärer Algorithmen, vgl. Abschnitt 3.5, unterstützt werden. Nach Coelho et al. [CEPR14] führen diese Parameter im Vergleich zur Dehnungsenergie oder zum Beulfaktor zu analogen Optimierungsergebnissen. Nach Michalatos und Kaijima [MK14] ist dies vor allem darauf zurückzuführen, dass die Problembeschreibung im Rahmen von evolutionären Algorithmen nicht auf einzelne (spezielle) Zielfunktionen beschränkt ist. Pugnale et al. [PES14] verweisen in diesem Zusammenhang darauf, dass die Ergebnisse der maximalen Verformung — im Gegensatz zur Dehnungsenergie — sowohl lokale, wie auch globale 'Strukturweichheit' charakterisieren. Ein weiteres Kriterium zur Einschätzung der Struktursteifigkeit wird von Ruth et al. [RHP12] mit der Analyse und Optimierung der 1. Eigenfrequenz eines Tragwerks angegeben, wobei eine Maximierung der 1. Eigenfrequenz eine Strukturversteifung verdeutlicht.

Nachfolgend wird die vorliegende Freiformfaserverbundschale aus statischer Sicht hinsichtlich des Kriteriums der vertikalen Verformung analysiert.

$$\min. u_z \in \mathbb{R} \quad (6.5)$$

6.2.2 Aspekte zur ökologischen Optimierung

Die Optimierung hinsichtlich ökologischer Kennwerte basiert auf den dargelegten Grundlagen in Kapitel 4. So ist im Sinne einer ganzheitlichen Betrachtung neben der Optimierung

aus statischer Sicht eine Minimierung der Ökobilanzkennwerte, vgl. Tabelle 4.1, der zu untersuchenden Struktur zu erzielen. Hierbei haben die Tragwerksform und die damit einhergehende Tragwerkseffizienz ebenso wie die Materialwahl entscheidenden Einfluss. Die Anwendung von Schalentragwerken ist dabei aufgrund des günstigen Tragverhaltens prinzipiell als positiv einzuschätzen. Die nachfolgende Optimierung der Freiformschalenstruktur aus faserverstärkten Kunststoffen wird aufgrund der vorliegenden Datenlage im Bereich der Umweltindikatoren auf Basis der *Embodied Energy*, vgl. Abschnitt 4.2 durchgeführt. Die für die Aktoren und somit zur adaptiven Beeinflussung des Tragwerks notwendige Betriebsenergie (*Operational Energy*) kann anhand nachstehender Formel berechnet werden, vgl. [Wei08].

$$\begin{aligned}
 W &= \sum E_i * (\delta_i)^2 * dV \\
 E &= E - \text{Modul Aktuator} \\
 \delta_i &= \text{aktivierte Dehnung} \\
 dV &= \text{erforderliches Volumen}
 \end{aligned}
 \tag{6.6}$$

6.3 Grundlagen und Annahmen

6.3.1 Geometrie- und Modellerzeugung

Die zu untersuchende Schale beschreibt eine Schale auf vier Auflagerpunkten, vgl. Abb. 6.1. Die Modellerzeugung wird komplett im CAD-Programmsystem *Rhinoceros* mit dem algorithmischen Programmieraufsatz *Grasshopper* parametrisch vollzogen, vgl. Kapitel 5 und Anhang A.1. Die Geometrie wird als räumliches Gesamtsystem modelliert. Durch die Nutzung der entwickelten Schnittstellen, vgl. Abschnitt 5.1.3, kann neben der Erzeugung der räumlichen Geometrie auch das Berechnungsmodell aufgebaut werden. Im vorliegenden Beispiel wird die Schalenstruktur in rechteckige bzw. quadratische Netze aufgelöst, welche in der Finite-Elemente-Berechnung als Berechnungsnetz berücksichtigt werden. Die anschließende Berechnung wird im Programmsystem *Sofistik* durchgeführt. Das FE-Netz basiert auf 4-Knoten-Schalenelementen mit sechs Freiheitsgraden je Knoten, vgl. Abb. 6.2. Nach [AG13] hängt die Ergebnisgenauigkeit von der Elementgeometrie ab. Das verwendete FE-Element wird in *Sofistik* als Schalenelement bzw. ‘quad’-Element bezeichnet und eignet sich für die Betrachtung der Scheiben-, Platten- und Membrantragwirkung. Die Plattentragwirkung des in *Sofistik* verwendeten Schalenelementes basiert auf der *Mindlinschen Plattentheorie*, wobei eine Erweiterung um einen nichtkonformen Ansatz nach Hughes [HT81], Tessler [TH83] und Crisfield [Cri84] verfolgt wird, vgl. [AG13]. Die Theorie nach Mindlin besagt, dass die Querschnitte weiterhin eben bleiben, aber eine Abweichung zur senkrechten Ausrichtung gegenüber der neutralen Achse eintritt. Die auftretenden Schubverdrehungen werden mit den Formfunktionen für die Verschiebungen

beschrieben. Die Summe aus Schubdeformation und Biegeverdrehung wird als Gesamtverdrehung bezeichnet [AG13]. In Abb. 6.3 sind die Schnittgrößen am verwendeten 'quad'-Element angetragen. Hierbei wird deutlich, dass die Platten- und Membrantheorie, vgl. Abschnitt 3.2 sehr gut umgesetzt ist. Weitere Informationen bezüglich der angewendeten Formeln sind [AG13] zu entnehmen.

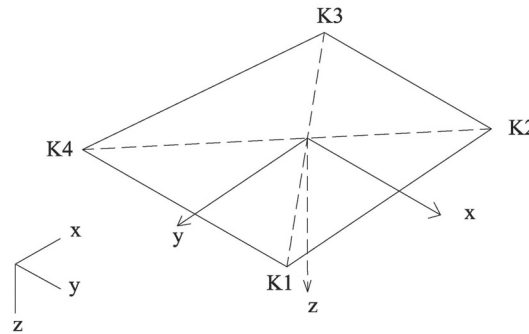


Abbildung 6.2: 4-knotiges-'quad'-Element nach [AG13]

Die Analyse der leichten Schalenstruktur wird aufgrund der zu erwartenden großen Verdrehungen und Verformungen geometrisch nichtlinear geführt. Im verwendeten Programmsystem *Sofistik* werden nichtlineare Berechnungen auf Basis eines Newton-Verfahrens mit konstanter Steifigkeit geführt, wobei „die Steifigkeitsmatrix nicht neu zerlegt werden muss und die Systemmatrix positiv definit bleibt“ ([AG13], S. 2-28).

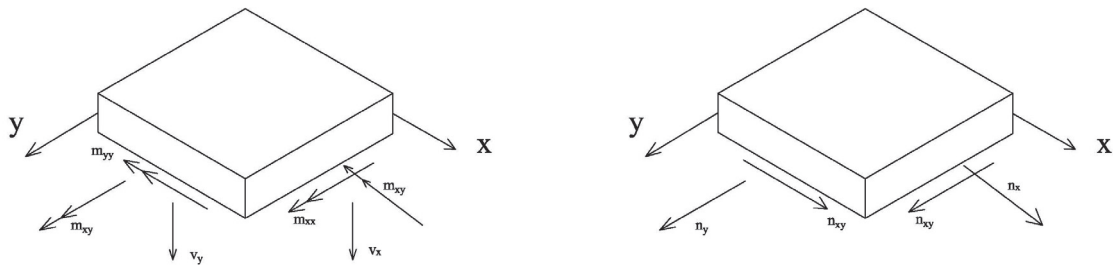


Abbildung 6.3: Schnittgrößen am 4-knotigen-'quad'-Element nach [AG13]

6.3.2 Formfindung

Die in den Abbildungen 6.1 und 6.17 verdeutlichte Schalenform wird über einen Formfindungsalgorithmus aus einer ebenen Form entwickelt. Hierbei erfolgt die Vernetzung als Rechteck-Elemente. Die Vernetzung kann unter Anwendung verschiedener Vernetzungsalgorithmen direkt im CAD-Programmsystem gesteuert werden. Eine Netzverfeinerung kann somit individuell angepasst werden. Anschließend wird für die Ausgangsgeometrie ein Formfindungsprozess durchgeführt. Ziel ist es, Spannungen infolge Eigengewicht zu kompensieren. Hierbei wird für die verwendeten Schalenelemente zunächst nur die Membrantragwirkung aktiviert. Die Formfindung selber erfordert aufgrund der großen Ver-

formungen eine nichtlineare Berechnung. Diese wird über die Anwendung der Theorie III. Ordnung berücksichtigt. Nach dem Abschluss der Formfindung kann die ‘gefundene’ Form unter Nutzung desselben FE-Elementes (‘quad-Element’) durch Berechnung der Schalenstruktur erfolgen. Hierbei wird neben der Membrantragwirkung auch die Plattentragwirkung sowie die Berücksichtigung zusätzlicher Verdrehungen der Normalen aktiviert. Aufgrund der Nutzung identischer FE-Elemente für die Formfindung wie auch für die Schalenberechnung eignet sich das verwendete Programmsystem hervorragend für die Formfindung und Analyse leichter Schalentragwerke.

6.3.3 Materialbeschreibung

Schalengrundmaterialien

Die Leistungsfähigkeit von Faserverbundschalentragwerken ist entscheidend durch die Orientierung der in der Matrix eingebundenen Fasern geprägt, vgl. Kapitel 3.4.4. Die Ermittlung der maßgebenden Lastflussrichtung ist somit von essenzieller Bedeutung und ermöglicht eine materialsparende und effektive Faseranordnung. Im Nachfolgenden werden für die Untersuchung der Freiformschale verschiedene Materialmodelle zugrunde gelegt. So werden, entsprechend der Tabellen 6.1 und 6.2, sowohl isotrope wie auch orthotrope¹ Materialien berücksichtigt. Der isotrope Ansatz verdeutlicht die Anwendung von Materialien richtungsunabhängiger Materialeigenschaften. Dieser Ansatz dient zur Berechnung von Referenzwerten und stellt die Basis der Ermittlung der Hauptspannungsrichtungen und somit der notwendigen Faserorientierung dar. Die angesetzten isotropen Materialkennwerte widerspiegeln typische Kennwerte glasfaserverstärkter Kunststoffe, wobei die besondere Annahme der richtungsunabhängigen Materialeigenschaften unterstellt wird.

Der orthotrope Ansatz korrespondiert mit den Eigenschaften glasfaserverstärkter Kunststoffe. Hierbei kommen glasfaserverstärkte Kunststoffe auf Epoxidharzbasis zur Anwendung [AG13]. Aufgrund der faserrichtungsabhängigen, orthotropen Eigenschaften und der auftretenden Belastungen in mehrere Raumrichtungen ist ein mehrlagiger Verbund auszubilden (unidirektional², bidirektional, multidirektional). Nach Dehn et al. [DHT05] weist eine unidirektionale Faserverstärkung in Faserrichtung wesentlich höhere Festigkeiten auf als quer zur Faserrichtung. Eine mehrlagige Anordnung kann hierbei in unterschiedlichen Richtungswinkeln generiert werden. Häufig kommt bei Faserverbundwerkstoffen eine Anordnung im 45°-Winkel gegenüber der Nachbarschicht zum Einsatz. Für die Berechnung des Faserverbundwerkstoffes wird für die einzelnen Schichten ein linear elastisches Materialverhalten angenommen. Des Weiteren wird von einem ebenen Spannungszustand ausgegangen und einer idealen Verklebung der einzelnen Laminatschichten. Durch die Verklebung der einzelnen Schichten entsteht ein Schichtverbund in Form von Laminaten [DHT05]. Das Versagen der Faserverbundwerkstoffe zeigt sich entweder als Reißen der Fasern und/oder der Matrix, als Verbundversagen von Faser und Matrix oder Delamination.

¹Richtungsabhängigkeit bzw. -unabhängigkeit der Materialeigenschaften

²Fasern des Faserverbundes sind in eine Richtung orientiert

Tabelle 6.1: isotrope Materialeigenschaften

Eigenschaften	Einheit	Wert
Elastizitätsmodul, E	$[N/mm^2]$	40.000
Schubmodul, G	$[N/mm^2]$	5.000
Querdehnzahl, ν	$[-]$	0,00
Dichte, ρ	$[kg/m^3]$	125

Auf die Versagensprozesse im Einzelnen wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht eingegangen.

Die anzusetzenden Materialien können jeweils mit den Finite-Elemente-Berechnungen des Programmsystems *Sofistik* unter Ansatz des Elementtyps ‘quad’ berücksichtigt werden. Die isotrope Berechnung erfolgt unter Nutzung des Moduls ‘MATE’ zur allgemeinen Definition von Materialeigenschaften. Demgegenüber erfolgt die Berechnung des lagenweisen Aufbaus über die Definition der richtungsorientierten Materialeigenschaften jeder einzelnen Lage. Die Materialeigenschaften der einzelnen Schichten werden jeweils schichtenweise definiert und anschließend als geschichtetes Gesamtmaterial zusammengefügt. Hierbei wird auf das *Sofistik*-Materialmodell ‘MLAY’ zurückgegriffen. In Abbildung 6.4 ist der angesetzte Schichtenaufbau verdeutlicht. Dieser Aufbau entspricht einer typischen Anordnung der einzelnen Faserlagen. Die berechnete Struktur wird hinsichtlich der Übereinstimmung der Faserrichtungen mit den tatsächlich notwendigen verglichen. Sofern eine Abweichung zwischen der Faserrichtung und den ermittelten Lastvektoren auftritt, können die einzelnen ‘quad’-Elemente entsprechend der auftretenden Hauptspannungsrichtungen ausgerichtet werden. Die genauen Materialparameter sind der Tabelle 6.2 zu entnehmen.

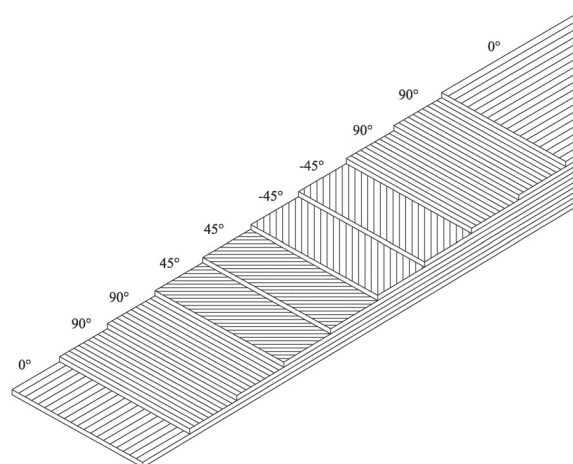


Abbildung 6.4: gewählter Schichtenaufbau für Freiformschale mit Winkelangabe

Die in Tabelle 6.2 angegebenen Materialkennwerte für glasfaserverstärkte Kunststoffe werden nach [Bb14] hinsichtlich einflussbedingter Einwirkungen abgemindert. Hierzu zählen sowohl die Lasteinwirkungsdauer (Faktor A_1), der Einfluss unterschiedlicher Medien (Fak-

Tabelle 6.2: orthotrope Materialeigenschaften GFK

Eigenschaften	Einheit	Wert
Elastizitätsmodul, E	$[N/mm^2]$	40.000
anisotroper Elastizitätsmodul, E90	$[N/mm^2]$	1.000
Schubmodul, G	$[N/mm^2]$	5.000
Schubmodul, G90	$[N/mm^2]$	5.000
Zugfestigkeit, f_y	$[MPa]$	550
Zugfestigkeit quer, f_{y90}	$[MPa]$	550
Querdehnzahl	$[-]$	0,00
Dichte	$[kg/m^3]$	125
Materialsicherheit	$[-]$	3,00

tor A_2) und die auftretende Umgebungstemperatur (Faktor A_3).

$$f_d = \frac{f_{k0,05}}{\gamma_M A(t)_1 A_2 A_3} \quad (6.7)$$

Knippers et al. [KJSO13] erweitern diesen Ansatz um die Berücksichtigung eines dynamischen Erhöhungsfaktors und des Materialermüdungsverhaltens.

$$f_d = \frac{f_{k0,05}}{\gamma_M A(t)_1 A_2 A_3 A_{dyn} A_{fat}} \quad (6.8)$$

Für die nachfolgenden Berechnungen wird nach [AG13] von einem globalen Sicherheitsbeiwert von 3,0 ausgegangen, wobei alle genannten Faktoren Berücksichtigung finden.

Adaptive Materialparameter

Entgegen den zuvor definierten und beschriebenen ‘klassischen’ Schalenmaterialien soll die zu berechnende Freiformschale hinsichtlich des Einsatzes adaptiver Materialien untersucht werden. Aufgrund der sehr unterschiedlichen Eigenschaften adaptiver Materialien, vgl. Kap. 2.2.2, wird die Berechnung unter Berücksichtigung unterschiedlicher Material- und Steifigkeitskennwerte durchgeführt. Hierzu wird eine Bandbreite an Eigenschaftskennwerten definiert. Die ausführliche Analyse der Berechnungsergebnisse ermöglicht die Evaluation sinnvoller und effektiver Kombinationen klassischer Schalenmaterialien mit adaptiven Materialien. Die Auswertung des Gesamtergebnisses wird durch eine Einordnung der notwendigen Eigenschaften der adaptiven Materialparameter in die entwickelte SMARTchoice-Matrix komplettiert, vgl. Kap. 2.2.3. Wie in Kap. 2.2.2 dargestellt, weisen adaptive Materialien neben unterschiedlichen Steifigkeiten bezüglich der zu realisierenden Frequenzen große Unterschiede auf. Um die Eignung dieser Werkstoffe in Bezug auf das Schwingungsverhalten zu prüfen, kann eine Analyse der einwirkenden Belastung, aber auch die Anwendung einer Eigenfrequenzanalyse sinnvoll sein. Die im Rahmen der Arbeit eingesetzten Kennwerte adaptiver Materialien unterliegen der zeitlichen Invarianz. Die adaptiven Materialien werden als integrierte Fasern in Faserverbundbauteilen verstanden.

Tabelle 6.3: adaptive Materialeigenschaften

Eigenschaften	Einheit	Wert
Elastizitätsmodul, E_{min}	$[N/mm^2]$	20.000
Elastizitätsmodul, E_{max}	$[N/mm^2]$	70.000

Das Gesamttragverhalten ist unter Ansatz einer effektiven Steifigkeit zu ermitteln, vgl. Formel (6.9).

$$V_{SMA} = \frac{A_{SMA}}{A_{FRP}} \quad (6.9)$$

$$E_{eff} = E_{SMA} * V_{SMA} + E_{FRP} * (1 - V_{SMA})$$

Dieser Ansatz korrespondiert mit dem Anspruch, die Auswahl geeigneter adaptiver Materialien und deren Anordnung im Bauteil in frühen Phasen des Entwurfs und der Planung zu unterstützen.

6.3.4 Belastung

Die Berechnung der Schalenstruktur erfolgt unter Berücksichtigung unterschiedlicher Lastansätze. So wird neben einer gleichmäßig verteilten Belastung auch eine halbseitige unsymmetrische Belastung aufgebracht, da Schalentragswerke auf diese Belastungsart besonders sensibel reagieren. Im verwendeten Programmsystem *Sofistik* können unterschiedlich gerichtete Lasten unter Nutzung des ‘SOFILOAD’ auf die Struktur aufgebracht werden. Für die Analyse der Schalenstruktur können die ‘quad’-Elemente mit Belastungen in Eigengewichtsrichtung, mit Belastungen global bezogen zur Projektionsfläche und mit Belastungen senkrecht zur Bauteiloberfläche belegt werden. Diese unterschiedlichen Projektionsrichtungen korrelieren mit den gängigen Belastungen Eigengewicht, Schnee und Wind. Die elementbezogene Belastungseingabe ermöglicht die Definition von Belastungen schachbrettartiger Anordnungen. Auf diese Weise können sämtliche mögliche Laststellungen generiert und die maximalen bzw. minimalen Schnittgrößen und Auflagerreaktionen ermittelt werden. Die Definition der Belastung erfolgt wie auch die Geometriedefinition auf parametrischer Basis, vgl. Kap. 5. Diese Vorgehensweise ermöglicht die Untersuchung einer Vielzahl an Belastungsvarianten. Speziell die Berücksichtigung unterschiedlicher Windrichtungen und daraus resultierender Belastungen ist möglich. Des Weiteren können auch wandernde Belastungen (Flächen- oder Einzellasten) Beachtung finden.

Die Anwendung von *Sofistik* ermöglicht ebenso die Analyse dynamischer Lastfälle. Die dynamische Berechnung kann bspw. eine Erdbebenanalyse (Antwortspektrenverfahren) umfassen. Im vorliegenden Beispiel werden die Lastfälle Eigengewicht zzgl. eines moderaten Dachaufbaus von $1,5 \text{ kN/m}^2$ (LF1) und eine ideelle Windlast (LF2) angesetzt.

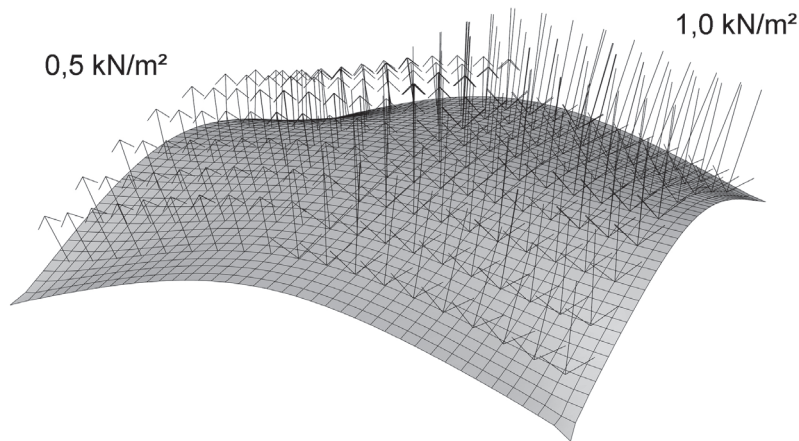


Abbildung 6.5: Windbelastung

Tabelle 6.4: Belastungen Schalentragwerk

Lastfall	Wert	Symmetriebetrachtung
LF 1 (g)	$g + 1,5 \text{ kN/m}^2$	symmetrisch
LF 2 (w)	$1,0 \text{ kN/m}^2$ bzw. $0,5 \text{ kN/m}^2$	halbseitig
LK 1 (g+w)	LF1+LF2	-

Diese Vorgehensweise zeigt die prinzipielle Arbeitsweise bei der Analyse unsymmetrischer Lastansätze und verdeutlicht die Besonderheit des Tragverhaltens von Schalentragwerken. In Tabelle 6.4 sind die verwendeten Lastansätze zusammengefasst.

6.3.5 Statische Berechnung adaptiver Tragwerke

Die vorgestellte Faserverbundschalenstruktur soll als adaptives Tragwerk nachfolgend statisch berechnet und optimiert werden. Das Strukturverhalten soll hierbei nicht ausschließlich passiv oder adaptiv erfolgen. Die Erfüllung der Grenzzustände der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit stellt somit einen weiteren Optimierungsschritt hin zu einer filigranen, materialminimalen Struktur dar. In Tabelle 6.5 ist ein mögliches Szenario verdeutlicht. Diese Aufstellung greift die Szenarien zur Sicherstellung der Tragfähigkeit und Ausfallsicherheit entsprechend Abschnitt 2.3 auf.

Das Tragverhalten adaptiver Strukturen kann auf Basis der „passiven“ und „aktiven“

Tabelle 6.5: Grenzzustände der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit bei passiven/adaptiven Strukturen

Untersuchungs- variante	LF/LFK	Nachweis GZT	Nachweis GZG
Nr. 1 - passives Tragverhalten	EG	GZT_{passiv}	GZG_{passiv}
	EG+Wind	GZT_{passiv}	GZG_{passiv}
Nr. 2 - adaptives Tragverhalten	EG	GZT_{passiv}	GZG_{passiv}
	EG+Wind	GZT_{passiv}	GZG_{adaptiv}

Spannungs- und Verformungsanteile ermittelt und im Sinne der Superposition können die „adaptiven“ Kennwerte ermittelt werden, vgl. Formel (6.10).

$$\begin{aligned}\sigma_{adaptiv} &= \sigma_{passiv} + \sigma_{aktiv} \\ N_{adaptiv} &= N_{passiv} + N_{aktiv} \\ u_{adaptiv} &= u_{passiv} + u_{aktiv}\end{aligned}\tag{6.10}$$

Die für die Aktivierung erforderliche Dehnung kann nach [Wei08] entsprechend der Formel (6.11) ermittelt werden. Die ermittelten und für die Aktivierung aufzubringenden Dehnungen sind stets vor dem Hintergrund der technischen Machbarkeit zu prüfen. Hierzu stellt die Auswahlmatrix *SMARTchoice*, vgl. Abschnitt 2.2.3, eine wesentliche Entscheidungs- und Entwurfsgrundlage dar.

$$\Delta\Delta F + E * \Delta\delta_{aktiv} = 0\tag{6.11}$$

6.4 Optimierung der adaptiven Schalenstruktur

In den Abschnitten 6.3.2 und 6.3.3 werden die für die Untersuchung der Freiformschale angesetzten Geometrie- und Materialparameter vorgestellt. Die Geometrie der Schale wird wesentlich durch die Formfindung beeinflusst, welche das äußere Erscheinungsbild aber auch die statische Leistungsfähigkeit definiert. Aus diesem Grund gilt es zu überprüfen, inwieweit die im Rahmen einer Formfindung generierte Schalenform einen leistungssteigernden Einfluss auf das Tragverhalten infolge der wesentlichen Eigengewichtslast aufweist. Zudem sind in Abschnitt 6.3.3 die Materialparameter faserverstärkter Kunststoffe zusammengetragen. Hierbei wird deutlich, dass die Materialanordnung innerhalb der Faserverbundwerkstoffe korrespondierend dem Spannungsverlauf angepasst werden kann. Aufgrund der unterschiedlichen Lastenfallwinkel auf Bauwerke infolge unterschiedlicher Lastfälle und Lastrichtung (z. B. Windrichtungen) ist eine derartige Untersuchung notwendig.

Nachfolgend wird eine Optimierungsbetrachtung dieser Parameter vorgestellt. Die Durchführung der Optimierung erfolgt auf Basis der entwickelten parametrischen Modell- und Berechnungsumgebung. Auf diese Weise ist eine direkte Analyse der Betrachtungs- und Optimierungsergebnisse möglich. So können auf der einen Seite die geometrisch-ästhetischen Kriterien der Schalenform als auch andererseits die statisch-tragwerksplanerisch relevanten Kriterien des Materialaufbaus und der Spannungs- und Verformungsverteilung evaluiert werden. Speziell die Einordnung der entwickelten Geometrieform aus architektonischer Sicht ist aufgrund der möglichen Ergebnis- und Modellrückführung in die CAD-Umgebung zu nennen.

6.4.1 Optimierung der Schalenform

Die Geometrie der in Abschnitt 6.3.2 generierten Schalenstruktur wird unter dem Ansatz der Kompensation des Eigengewichts mithilfe eines Formfindungsprozesses ermittelt. Nachfolgend werden hierbei verschiedene maximale Schalenhöhen erzeugt. Anschließend erfolgt eine statische Spannungs- und Verformungsanalyse, wobei neben den unterschiedlichen Schalenhöhen verschiedene Schalendicken und Materialparameter (E-Moduli) untersucht werden. Die Optimierung der Schale auf Basis der Formfindung kann hinsichtlich unterschiedlicher Kriterien bewertet werden, vgl. Abschnitt 6.2.1.

Als Untersuchungsbelastung wird das Struktureigengewicht als auch eine gleichmäßig verteilte vertikale Belastung von $1,5 \text{ kN/m}^2$ aufgebracht. Die zu untersuchenden Parameter sind hierbei:

- Schalenhöhe $\in [0,00 \text{ m} \dots 1,25 \text{ m}]$
- E-Modul $\in [20.000 \text{ N/mm}^2 \dots 70.000 \text{ N/mm}^2]$
- Schalendicke $\in [0,01 \text{ m} \dots 0,05 \text{ m}]$

Die zu untersuchenden Materialfestigkeiten umfassen zum einen Bereiche von Faserverbundwerkstoffen (bis 40.000 N/mm^2 für glasfaserverstärkte Kunststoffe) und zum anderen für Funktionsmaterialien (bis ca. 100.000 N/mm^2). Der in der Untersuchung angesetzte obere Grenzwert von 70.000 N/mm^2 (E-Modul) kann über eine Verbundfestigkeit (effektive Festigkeit) zwischen glasfaserverstärkten Kunststoffen und Smart Materials erzielt werden.

In Abb. 6.6 ist ein Verformungsplot über alle zu untersuchenden Parameter zusammengefasst. Hierbei ist deutlich zu erkennen, dass unabhängig von der Schalendicke die Formfindung (Höhe der Schale) einen maßgeblichen Einfluss auf das Verformungsverhalten hat. Es ist aber auch zu erkennen, dass im vorliegenden Fall ein Optimum der Schalenhöhe (Stich in der Mitte der Schale) bei $0,75 \text{ m}$ bis $1,00 \text{ m}$ in Bezug auf das Verformungsverhalten eintritt. Die Reduzierung der Verformung infolge der Steigerung des E-Moduls ist ebenso erkennbar, wobei dieser Effekt gegenüber den Auswirkungen der Formfindung eher gering ausfällt.

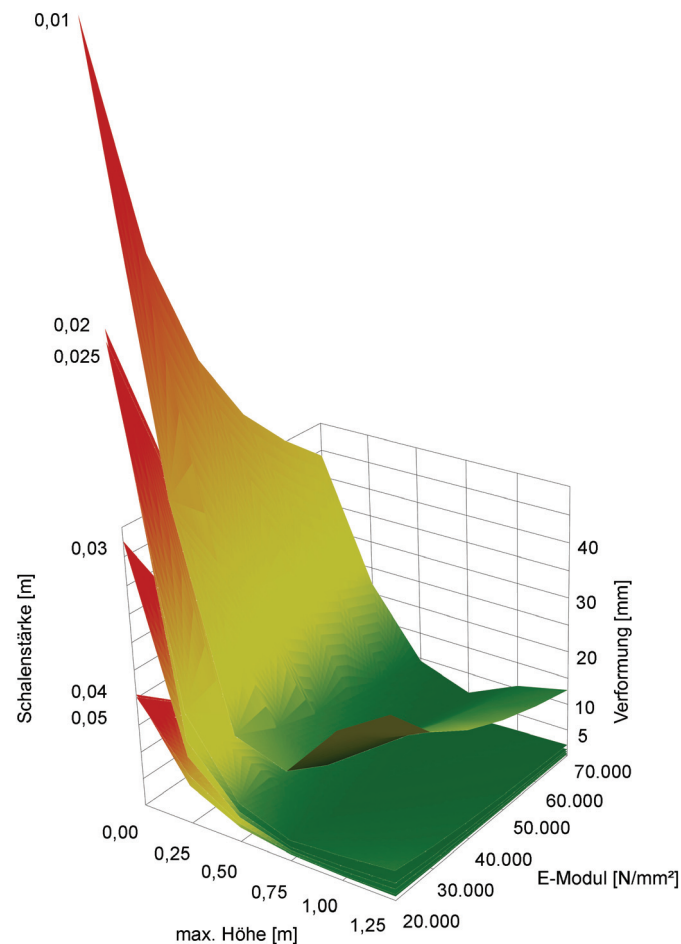


Abbildung 6.6: Verformungsverhalten in Bezug auf Schalenhöhe, Schalenstärke und E-Modul

In Abb. 6.7 ist die für die weitere Bearbeitung als Vorzugsvariante gewählte Schalendicke von $0,025 \text{ m}$ und die Verformung in Abhängigkeit des E-Moduls als auch der Schalenhöhe

dargestellt. In diesem Plot wird besonders deutlich, dass infolge der Formfindung eine enorme Reduzierung der Verformung erzielt werden kann. Es ist jedoch auch erkennbar, dass bereits bei einer Höhe von ca. 0,75 m bis 1,00 m eine Sättigung eintritt. In diesem Fall soll eine moderate Höhe gewählt werden, da ansonsten infolge der größeren Höhe zum einen die Windlasten von größerer Bedeutung sind und die Bauteilgesamtmasse sich infolge des größeren Volumens steigert.

Für die weitere Bearbeitung wird eine Schalenhöhe von 0,90 m und ein E-Modul für die Schalengrundmaterialien von 40.000 N/mm² angenommen.

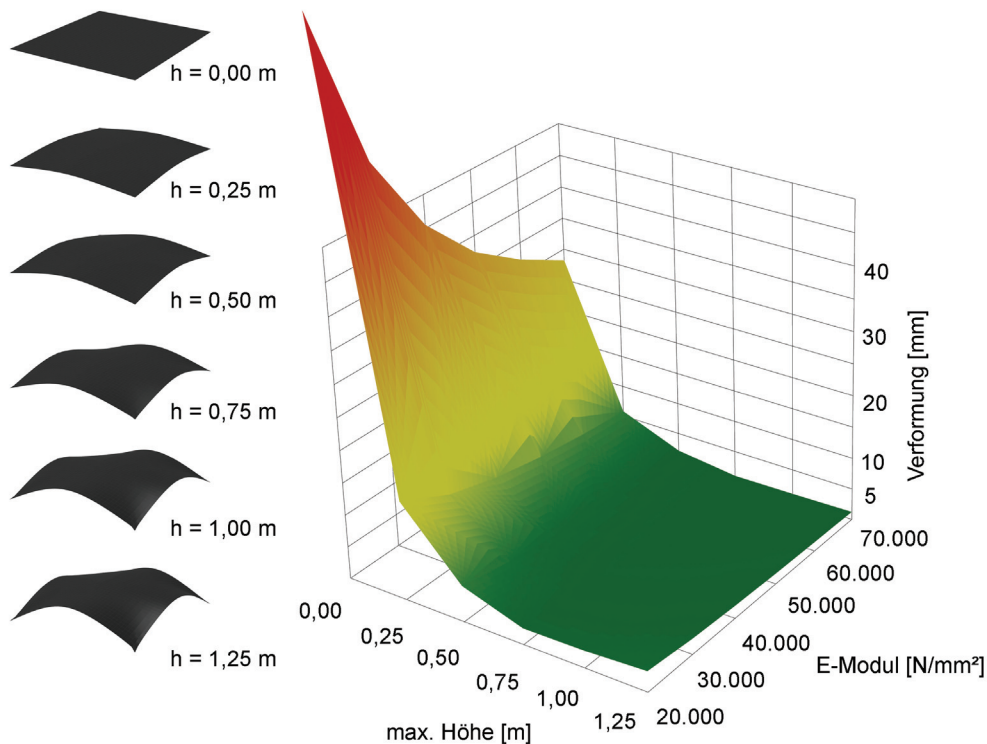
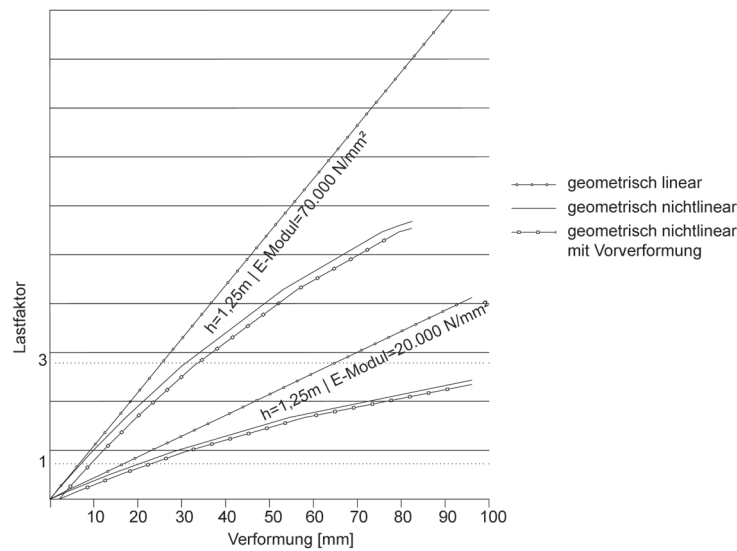


Abbildung 6.7: Verformungsverhalten der Vorzugsvariante ($d = 0,025$ m) in Bezug auf Schalenhöhe und E-Modul

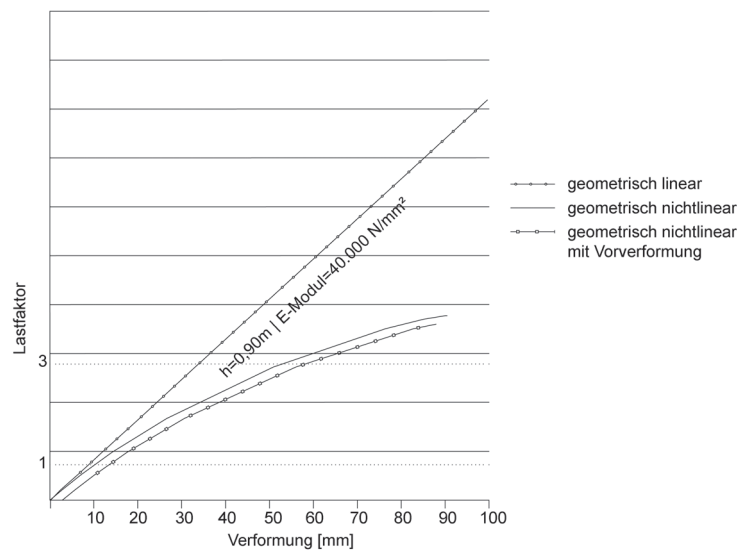
Neben der gegenüberstellenden Betrachtung des Verformungsverhaltens ist eine Beulanalyse nach Abschnitt 3.4 durchzuführen. Hierbei werden je untersuchter Schale drei Betrachtungen geführt. So erfolgt eine geometrisch-lineare und eine geometrisch-nichtlineare Berechnung sowie eine geometrisch-nichtlineare Berechnung mit Vorverformung. Die Vorverformung wird auf Basis der Beuleigenformen der Struktur ermittelt und aufgebracht. Entsprechend der Abb. 6.6 werden exemplarisch zwei Schalenvarianten ($h=1,25$ m / E-Modul = 20.000 N/mm² und $h=1,25$ m / E-Modul = 70.000 N/mm²) betrachtet, vgl. hierzu Abb. 6.8. Hierbei ist deutlich festzustellen, dass die Steigerung des E-Moduls eine signifikante Steigerung der Beulsteifigkeit nach sich zieht, wobei die Variante ($h=1,25$ m / E-Modul = 70.000 N/mm²) den Lastfaktor 3 deutlich erreicht und überschreitet.

Entsprechend Abb. 6.7 wird eine Schalenvariante ermittelt, welche trotz geringer Höhe und



Abbildungung 6.8: Lastverformungskurven ($h=1,25$ m, $E\text{-Modul} = 20.000$ N/mm²; $h=1,25$ m, $E\text{-Modul} = 70.000$ N/mm²)

geringeren E-Moduli ausreichende Verformungseigenschaften aufweist. Auch diese Variante wird hinsichtlich der Beulsteifigkeit untersucht. Nach Abb. 6.9 kann gezeigt werden, dass bei dieser Geometrie-Materialkombination eine ausreichende Beulsteifigkeit erzielt werden kann.



Abbildungung 6.9: Lastverformungskurve der Vorzugsvariante ($h=0,90$ m, $E\text{-Modul} = 40.000$ N/mm²)

6.4.2 Optimierung der Materialkomposition

Faserverbundwerkstoffe sind aufgrund der ausgeprägten orthotropen Fasereigenschaften für jeden spezifischen Anwendungszweck individuell zu entwickeln — 'zu komponieren',

vgl. Abschnitt 3.4.4. In Abb. 3.26 ist der Zusammenhang zwischen der Steifigkeit und der Faserrichtung dargestellt. Zur Überprüfung der anzusetzenden Materialparameter, vgl. Abschnitt 6.3.3, soll für die vorliegende Schalenstruktur sowohl ein isotropes Faserverbundmaterial als auch ein orthotroper Schichtenaufbau Anwendung finden. In Abb. 6.10 ist der Zusammenhang 'Winkel-Faserrichtung-Kraftfluss' für die untersuchte Schale auf Basis des isotropen als auch des orthotropen Materialansatzes dargestellt. Für die Ermittlung der Einzelkennwerte wird die Elementorientierung jedes einzelnen Elementes in Bezug auf die Hauptspannungsrichtung variiert, vgl. Abb. 6.11. Die Variation der Verdrehung erfolgt in den Schritten 15° , 30° , 45° , 60° , 75° und 90° zur Hauptspannungsrichtung. Es wird deutlich, dass das gewählte Materialmodell für isotrope Anwendung die typische Korrelation zwischen Faserrichtung und Kraftfluss aufweist. Die Ergebnisse entsprechen exakt den Werten nach Abb. 3.26. Ebenso kann gezeigt werden, dass der gewählte Schichtenaufbau nach Abb. 6.4 weitestgehend orthotrope Eigenschaften aufweist. Zudem kann aufgrund der Nutzung der parametrischen Gesamtmodellierungs- und Berechnungsumgebung die Faserausrichtung in die CAD-Umgebung überführt werden. Auf diese Weise ist eine visuell vereinfachte Kontrolle der Ergebnisse möglich. Die Herstellung einer optimierten Faseranordnung wird erleichtert. Für die weitere Bearbeitung wird das orthotrope Materialmodell genutzt, da die im Bauwesen typischen unterschiedlichen Belastungsrichtungen überwiegen.

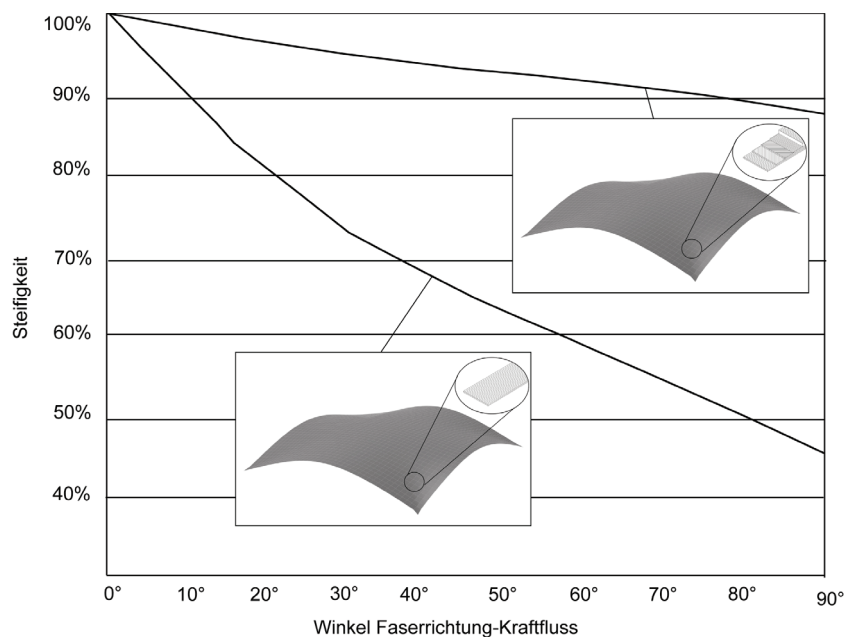


Abbildung 6.10: Einfluss Faserrichtung-Kraftfluss der Freiformschale

6.4.3 Optimierung der adaptiven Materialkomposition

Die Leistungsfähigkeit adaptiver Strukturen hängt im Wesentlichen von der Anordnung der Funktionsmaterialien innerhalb der Struktur, deren mechanischen Eigenschaften und

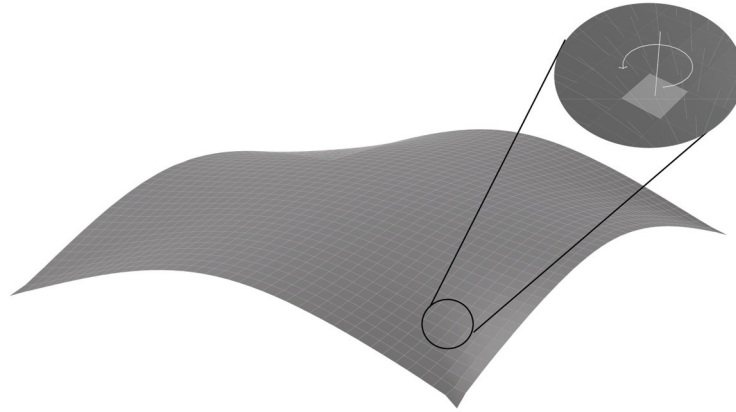


Abbildung 6.11: Ausrichtung der Faserrichtung

von den aufgebracht und aufzubringbaren Dehnungen ab. Die Ermittlung der optimalen Position und einzutragenden Dehnung erfolgt mit dem Ziel der Minimierung der Spannung und Verformung innerhalb der Struktur, vgl. Formel (6.12) (nach [Wei08]).

Minimiere

$$\begin{aligned}
 f &= \text{Max } |\sigma_{adapt}| \\
 \sigma_{adapt} &= \sigma_{passiv} + \sigma_{aktiv} \\
 \sigma_{passiv} &= \text{const.} \quad \sigma_{aktiv} = g(\delta_{aktiv})
 \end{aligned} \tag{6.12}$$

Vor dem Hintergrund des Einsatzes von Faserverbundwerkstoffen und deren steuerbarer Eigenschaften erscheint es sinnvoll, die in Bezug auf die zu minimierende maximale Verformung eines Systems optimale Kombination aus aufzubringender durchschnittlicher Dehnung und realisierbarem effektivem E-Modul zu ermitteln. Hierbei werden die maximal beanspruchten Bereiche einer Schale identifiziert und einer Ertüchtigung infolge Aktivierung unterzogen. Diese Bereiche werden für die Ermittlung des aktiven und somit adaptiven Systemzustandes mithilfe eines effektiven E-Moduls simuliert, vgl. Formel (6.9). Auch die Aktivierung einer Dehnung erfolgt nur in diesen zu aktivierenden Teilbereichen der Struktur.

In Abb. 6.12 wird die maximale Vertikalverformung der Schalenstruktur in Abhängigkeit der aufgetragenen Dehnung und der Kombination aus E-Modul des Grundmaterials als auch des effektiven E-Moduls im Bereich der aktivierten Flächen aufgetragen. Die betrachteten E-Moduli umfassen zum einen das Schalengrundmaterial (glasfaserverstärkter Kunststoff 40.000 N/mm²) und andererseits effektive E-Moduli im Bereich der Aktivierung durch im GFK implementierte Formgedächtnislegierungsfasern, vgl. Tabelle 2.1. Hierbei wird von E-Moduli im Bereich von 50.000, 60.000, 70.000 N/mm² ausgegangen. Der

Ansatz des E-Moduls von 40.000 N/mm^2 stellt in dieser Aufstellung somit eine passive Vergleichsvariante dar. Die in Abb. 6.12 aufgetragenen E-Moduli 50.000 , 60.000 , 70.000 N/mm^2 sind hierbei nicht über die gesamte Schalenfläche aktiv, sondern nur im Bereich der Aktivierung, vgl. hierzu auch Abb. 6.13. Weitere typische Kennwerte von Funktionsmaterialien sind in Abschnitt 6.3.3 zusammengefasst. Die untersuchte Schale ist dabei den Lastfällen Eigengewicht (symmetrisch) und Wind (asymmetrisch) ausgesetzt. Neben der Berücksichtigung der effektiven Steifigkeit werden die aktivierten Bereiche einer Dehnung δ_{aktiv} unterzogen. Die untersuchten Grenzwerte der durchschnittlich induzierten Dehnung umfassen hierbei $0,000$, $0,005$, $0,025$, $0,050$, $0,075$ bzw. $0,090 \%$. Auf diese Weise soll eine Abwägung zwischen einzutragender Dehnung, damit einhergehender Arbeit und erzielter Verformung ermittelt werden. Die technisch realisierbare Dehnung folgt hierbei den Werten nach Tabelle 2.1.

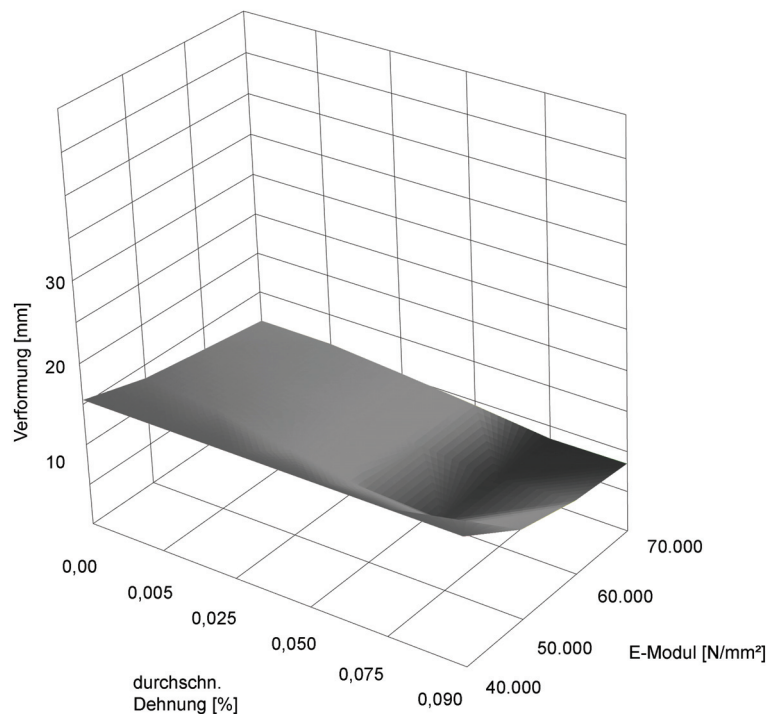


Abbildung 6.12: Evaluation der E-Modul-Dehnungs-Verformungsbeziehung

In Abb. 6.12 sind die ermittelten minimalen Verformungswerte u_{adapt} , vgl. Formel (6.10), dargestellt. Die hier zusammengefassten Verformungen basieren auf Schalenstrukturen einheitlicher Dicke. Anhand dieser graphischen Darstellung wird deutlich, dass infolge der Steigerung des E-Moduls im Aktivierungsbereich als auch der Dehnung (Vorspannung) eine Reduzierung der Verformung erzielt werden kann. Die Reduzierung der Verformung ist auf die steifigkeitserhöhende Wirkung der adaptiven Tragwirkung zurückzuführen. Die Evaluierung der optimalen Kombination aus Steifigkeit im Aktivierungsbereich und Dehnung ist jedoch vor dem Hintergrund der notwendigen einzutragenden Energie kritisch zu betrachten; diese notwendige Arbeit (*Operational Energy*) kann nach Formel (6.6) ermittelt werden. Abb. 6.13 ist als Erweiterung der Abb. 6.12 zu verstehen, da infolge dieser Darstellung sowohl die maximale Vertikalverformung als auch die dafür notwendige Arbeit

(*Operational Energy*) gegenüberstellend bewertet werden kann. Es wird deutlich, dass die Erzielung der minimalsten Verformungen bei ca. 0,090 % durchschnittlicher Dehnung mit einem enorm hohen Arbeitsaufwand (Energieaufwand) einhergeht. Die vorliegende Grafik kann somit zum Auffinden des optimalen Verhältnisses zwischen effektivem E-Modul, aufzubringendem Arbeitsaufwand und erzielbarer Verformung herangezogen werden. Bei der vorliegenden Schale stellt sich ein sehr günstiger Energie-Verformungszusammenhang bei den Kennwerten (effektiver E-Modul = 50.000 N/mm² und Dehnung 0,025 %) ein.

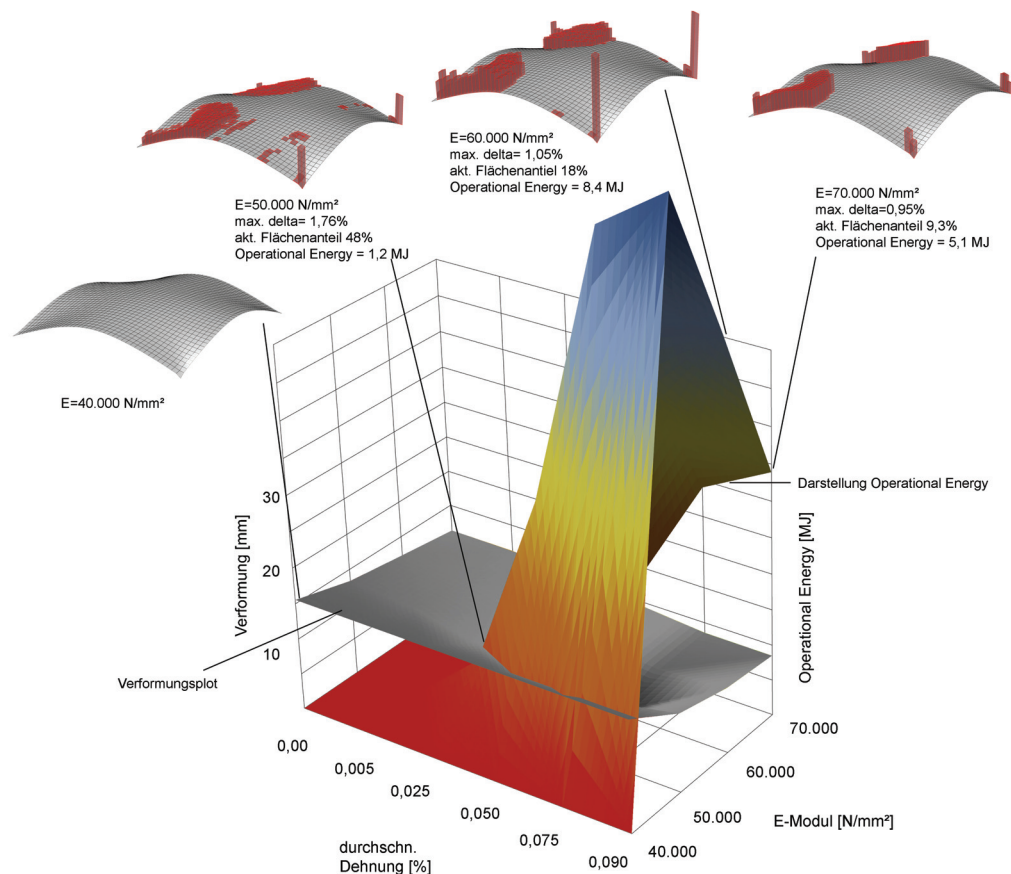


Abbildung 6.13: Evaluation der E-Modul-Dehnungs-Energie-Verformungsbeziehung

In Abb. 6.14 ist die als optimale Schalenvariante evaluierte Variante dieser Untersuchung mit den zu aktivierenden Elementbereichen dargestellt. In dieser Darstellung wird deutlich, dass die notwendige Dehnungsaktivierung über die Schalenfläche unterschiedliche Werte annimmt. Unter Berücksichtigung dieses Aspektes kann der somit notwendige Arbeitsaufwand (Energiebedarf) minimiert werden.

In Abb. 6.15 sind die in Abb. 6.13 verdeutlichten Varianten hinsichtlich der Beulsteifigkeit zusammengefasst. Hierbei kann gezeigt werden, dass der Einfluss der Adaption die Beulsteifigkeit signifikant steigert. Jedoch wird auch ersichtlich, dass bei morderater Aktivierung die größte Steigerung gegenüber der passiven Struktur erreicht wird, vgl. Abb. (6.15, oben). Die als Vorzugsvariante ermittelte Schalenkonstruktion stellt demzufolge auch aus

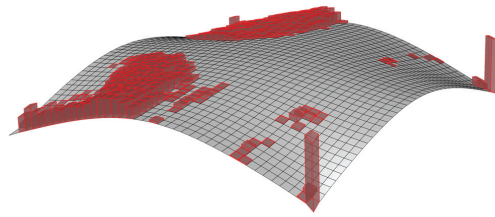


Abbildung 6.14: Schalenvariante ($E\text{-Modul} = 50.000 \text{ N/mm}^2$, $\text{Dehnung} = 0,025 \text{ \%}$) —
Dehnungsaktivierung

Sicht der Beulsteifigkeit eine geeignete Lösung dar, vgl. Abb. 6.14. Zudem wird die Notwendigkeit einer ganzheitlichen Betrachtungsweise ersichtlich.

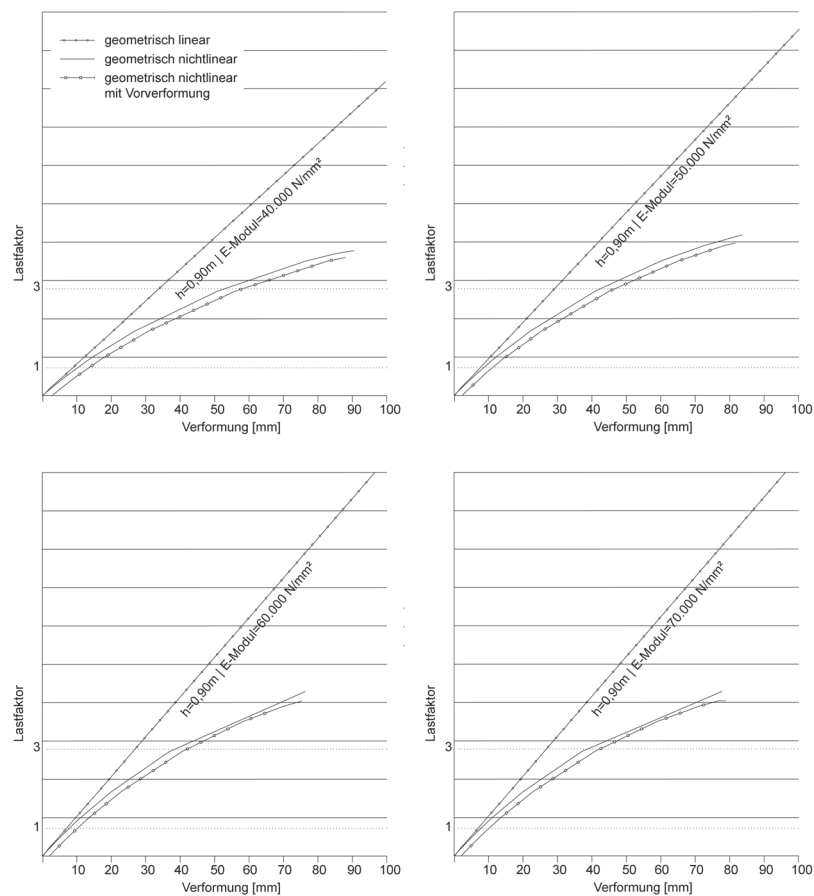


Abbildung 6.15: Lastverformungsverhalten der Varianten entsprechend Abb. 6.13

Neben der Darstellung der vorteilhaften Eigenschaften der adaptiv verstärkten Schalenstruktur in Bezug auf die Minimierung der maximalen Verformung und der Ermittlung des dafür notwendigen Arbeitsaufwandes (*Operational Energy*) ist zudem die Gesamtenergiebilanz dieser Strukturen zu analysieren. Erst auf Basis dieser Einschätzung kann eine abschließende Betrachtung der Nachhaltigkeit adaptiver Strukturen geführt werden.

In Abschnitt 6.2.2 wird die Betrachtung sowohl der *Operational Energy* als auch der in den Strukturmaterialien eingeschlossenen *Embodied Energy* vorgestellt. Für die vorliegende Schalenstruktur wird hierzu eine vergleichende Berechnung der notwendigen Schalenstärke einer passiven und einer adaptiven Schale in Bezug auf zulässige einzuhaltende Verformungsgrenzwerte (Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit) durchgeführt. In Abb. 6.16 wird deutlich, dass die Erfüllung zunehmender Verformungsbeschränkungen bei passiven Strukturen zu kontinuierlichen Steigerungen der Schalenstärke führt. Die somit ermittelte *Embodied Energy* steigt an. Demgegenüber wird eine vergleichende Analyse der adaptiv ertüchtigten Schale durchgeführt. Hierbei kann die Schalenstärke konstant belassen werden (*Embodied Energy* = konst.) und der notwendige Arbeitsaufwand (*Operational Energy*) wird ermittelt. Entsprechend der in Abb. 6.16 verdeutlichten Gegenüberstellung passiver und adaptiver Strukturen, unter den gegebenen Randbedingungen der vorliegenden Betrachtung, ergibt sich eine Reduzierung der *Embodied Energy* von ca. 30 % durch die Integration der Adaptivität.

Die berechnete Differenz zwischen rein passiven Strukturen (*Embodied Energy*)_{passiv} und adaptiven Strukturen (*Embodied Energy*)_{adaptiv} kann als Δ_{Energy} bezeichnet werden. Eine adaptive Schale kann als nachhaltig beurteilt werden, wenn die materialabhängigen Energieaufwendungen der adaptiven Struktur (*Embodied Energy*)_{adaptiv} zuzüglich der über die Standzeit notwendigen Aktuationsenergie $\sum Operational Energy$ die Energieaufwendungen einer verformungsidentischen passiven Struktur (*Embodied Energy*)_{passiv} nicht übersteigen, vgl. Formel 6.13. Anhand dieser Formel kann eine gesamtenergetische Betrachtung erfolgen.

$$\begin{aligned}\Delta_{Energy} &= EE_{passiv,passiv} - EE_{adaptiv} \\ EE_{adaptiv} &= EE_{Grund,adaptiv} + EE_{aktiv} + \Sigma OE(t)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}EE_{passiv,passiv} &= Embodied Energy (passive Strukturen) [MJ] \\ EE_{Grund,adaptiv} &= Embodied Energy (Grundmaterialien adaptiver Strukturen) [MJ] \\ EE_{aktiv} &= Embodied Energy (Funktionsmaterialien) [MJ] \\ \Sigma OE(t) &= Operational Energy f(t) [MJ]\end{aligned}$$

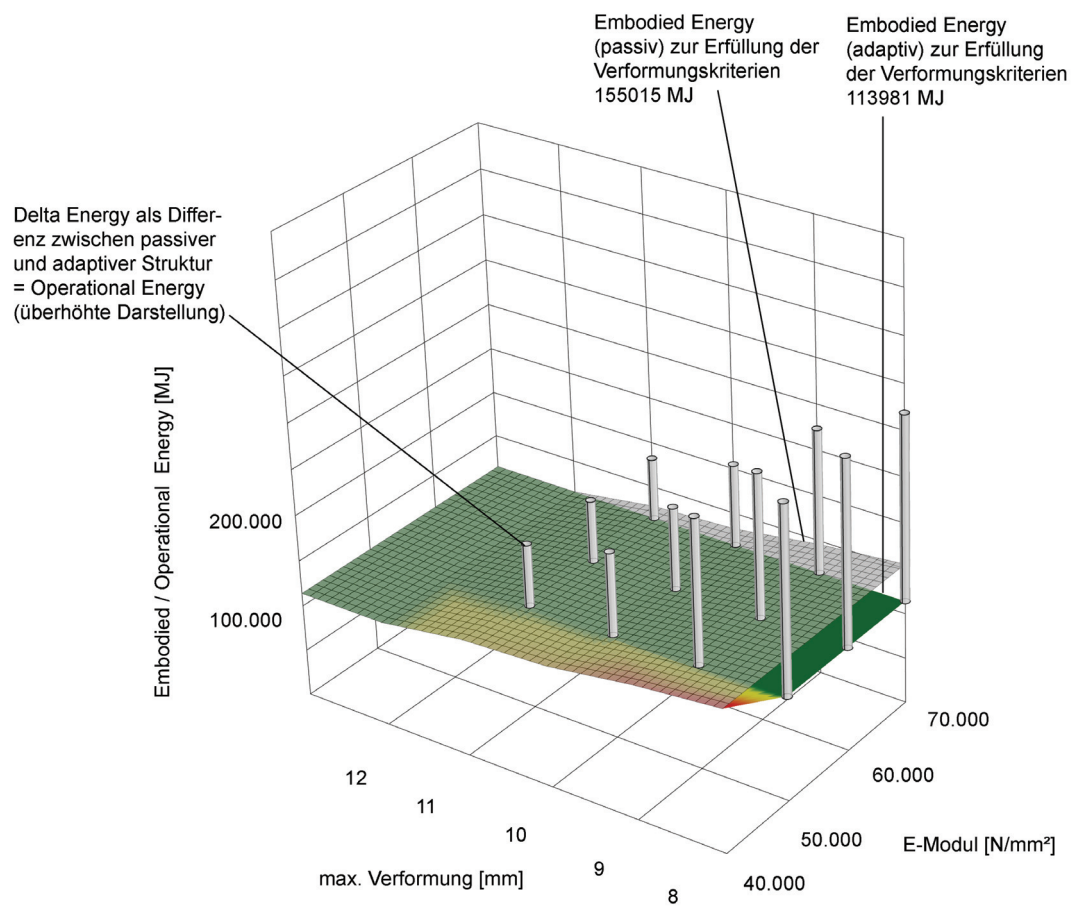


Abbildung 6.16: Energiebetrachtungen adaptiver/passiver Systeme

Die Ermittlung der Kennwerte der *Embodied Energy* der Grundmaterialien erfolgt auf Basis der ökologischen Kennwerte entsprechend Abschnitt 4 und 4.2. Die Datengrundlagen für sämtliche Materialien im Bauwesen sind weitestgehend verfügbar. Demgegenüber ist die Informationsdichte der Ökobilanzkennwerte, wie schon in Abschnitt 4.2 dargestellt, für die noch neuartige Werkstoffgruppe der Smart Materials kaum bis nicht verfügbar. Vor diesem Hintergrund kann derzeit keine abschließende Einschätzung der Gesamtökobilanz von faserverstärkten Kunststoffen mit integrierten Funktionsmaterialien in Form von Faseraktoren vorgenommen werden. Dennoch stellt die entwickelte Formel (6.13) für zukünftige Lebenszyklusanalysen adaptiver Tragwerke eine wesentliche Arbeitsgrundlage dar. Diese Formel kann in Formel (6.14) umgeformt werden und ermöglicht so die Berechnung eines oberen Grenzwertes für die *Embodied Energy* der Funktionsmaterialien, welcher die Umsetzung nachhaltiger adaptiver Tragwerke ermöglicht. Diese Berechnung kann in die zukünftige Entwicklung nachhaltiger Funktionsmaterialien einfließen. Zudem kann mithilfe von Formel (6.15) die Anzahl der Aktuationen ermittelt werden, welche im Rahmen einer nachhaltigen Gesamtbetrachtung zulässig sind. Hierbei sind entsprechend Formel (6.13) die Aufwendungen bezüglich der Herstellung der Smart Materials zu berücksichtigen. Im Hinblick auf diese Betrachtungsweise können zukünftige adaptive Tragwerke hinsichtlich der geplanten Standzeit und der Wahrscheinlichkeit des Auftretens des Lastereignisses geprüft werden. Diese Herangehensweise ist hervorragend für die nachhaltige Planung von temporären Bauwerken geeignet.

$$zul. EE_{aktiv} = EE_{passiv,passiv} - EE_{Grund,adaptiv} - \Sigma OE(t)$$

$$zul. EE_{aktiv} = max. EE (Funktionsmaterialien adaptiver Strukturen) [MJ] \quad (6.14)$$

$$n_{Aktor} = \frac{\Delta_{Energy}}{OE_{Einzelaktuation}} = \frac{EE_{passiv,passiv} - EE_{adaptiv}}{OE_{Einzelaktuation}} \quad (6.15)$$

Tabelle 6.6: Faserverbundschalenstruktur — Untersuchungsmatrix

Untersuchungs- variante	LF/LFK	Nachweis GZT	Nachweis GZG	Nachhaltigkeit
Nr. 1 - passives	EG	GZT_{passiv}	GZG_{passiv}	<i>Embodied Energy 100 %</i>
Tragverhalten	EG+Wind	GZT_{passiv}	GZG_{passiv}	<i>Operational Energy 0 %</i>
Nr. 2 - adaptives	EG	GZT_{passiv}	GZG_{passiv}	<i>Embodied Energy ? %</i>
Tragverhalten	EG+Wind	GZT_{passiv}	$GZG_{text{adaptiv}}$	<i>Operational Energy ? %</i>

6.5 Darstellung ausgewählter Optimierungsergebnisse

Nachfolgend wird auf Basis der zuvor ermittelten Optimierungsbetrachtungen die Vorzugsvariante hinsichtlich der in Tabelle 6.6 zusammengefassten Untersuchungskriterien vorgestellt und betrachtet. Hierbei finden vor allem die Aspekte der Tragfähigkeits- und Gebrauchstauglichkeitszustände Berücksichtigung.

6.5.1 Beschreibung der passiven/adaptiven Tragstruktur

In Abb. 6.17 ist die hier untersuchte Variante dargestellt. Die Schale hat einen ermittelten optimalen Schalenstich von ca. 0,90 m.

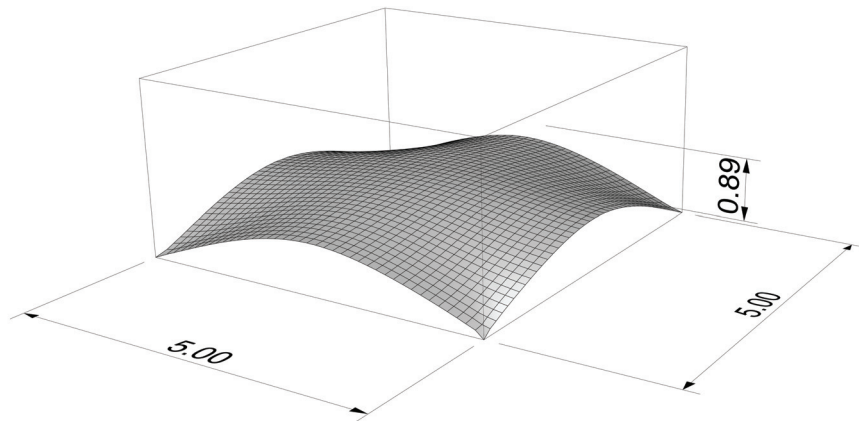


Abbildung 6.17: Darstellung Untersuchungsvariante

Anschließend wird eine vergleichende Betrachtung einer passiven und einer adaptiv ertüchtigten Variante vorgestellt. In Abb. 6.18 sind die wesentlichen Schalen- und Materialparameter zusammengefasst.

Die passive Schalenstruktur hat eine Schalenstärke von 0,029 m. Diese Stärke erfüllt die geforderten Bedingungen der Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit (zul. $f = 11 \text{ mm}$) für die angesetzten Lastfälle (EG + Wind). Zudem wird die Schale unter Ansatz des

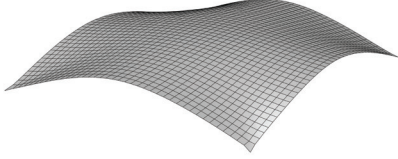
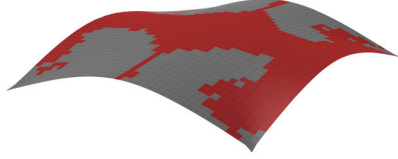
passive Struktur	adaptive Struktur
	
$d = 0,029 \text{ m}$ $E = 40.000 \text{ N/mm}^2$	$d = 0,025 \text{ m}$ $E = 40.000 \text{ N/mm}^2$ $+50.560 \text{ N/mm}^2$ (aktivierte Bereiche) $\bar{\delta}_{\text{aktiv}} = 0,025 \%$ max. $\delta_{\text{aktiv}} = 1,76 \%$

Abbildung 6.18: Gegenüberstellung Untersuchungsvariante passiv/adaptiv

quasi-isotropen Schalengrundmaterials GFK ($E=40.000 \text{ N/mm}^2$) modelliert. Die adaptive Schalenstruktur weist eine Stärke von $0,025 \text{ m}$ auf, da die Erfüllung der geforderten Maximalverformung infolge der adaptiven Ertüchtigung realisiert wird. Somit erfolgt die Aktivierung entsprechend Tabelle 6.6 nur für den Lastfall (EG+Wind) im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit. Die Erfüllung des Grenzzustandes der Tragfähigkeit wird vor dem Hintergrund möglicher Ausfallszenarien, vgl. Abschnitt 2.3, als passive Struktur betrachtet. Der angesetzte E-Modul im Fall der Aktivierung wird als effektiver E-Modul nach Formel (6.9) ermittelt. Im vorliegenden Fall werden die aktivierten Bereiche mit $E=50.560 \text{ N/mm}^2$ und die passiven Bereiche mit $E=40.000 \text{ N/mm}^2$ modelliert. Die für die Aktivierung angesetzte Dehnung beträgt durchschnittlich $\delta_{\text{aktiv}} = 0,025 \%$ und im Maximalbereich $\delta_{\text{aktiv,max}} = 1,76 \%$. Die zu aktivierenden Bereiche sind in Abb. 6.18 dargestellt, wobei die Aktivierung in Abhängigkeit von der Windrichtung variieren kann.

In Abb. 6.19 sind die wesentlichen Ergebnisse der passiven als auch der adaptiven Variante zusammengefasst. So kann gezeigt werden, dass beide Varianten im LF EG eine sehr geringe Maximalverformung aufweisen. Auch die Maximalspannungen fallen aufgrund der Formfindung gering aus. Die Analyse des Lastfalls EG+Wind ergibt, dass beide Varianten die zulässigen Spannungen als auch die zuvor definierte maximale Vertikalverformung von 11 mm nicht überschreiten. Die Auswertung der notwendigen Energieaufwendungen für Erstellung und Betrieb der Struktur zeigt, dass für die passive Struktur höhere Werte der *Embodied Energy* anfallen, wohingegen bei der adaptiven Struktur zusätzlich Energieaufwendungen für den Betrieb — die *Aktuation* — anfallen (*Operational Energy*).

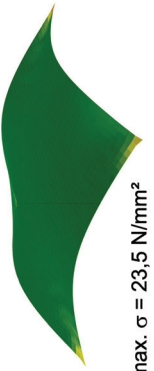
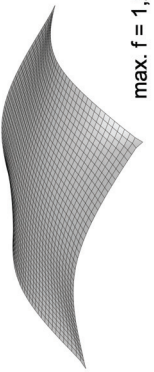
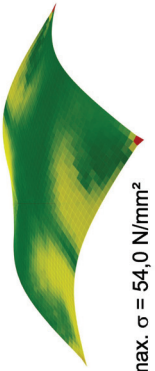
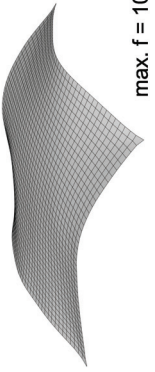
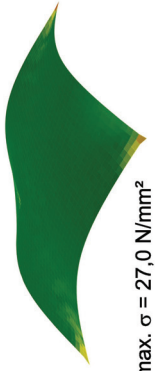
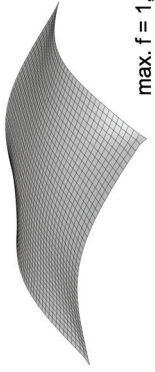
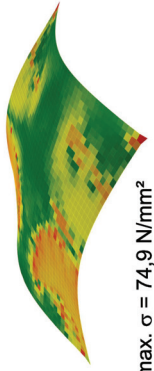
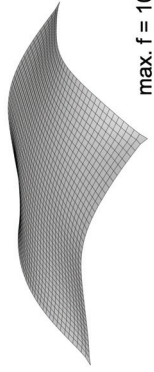
Variante:	LF/LFK	GZT	GZG	Energiebetrachtung
passiv $d = 0,029 \text{ m}$ $E = 40.000 \text{ N/mm}^2$	EG	 $\max. \sigma = 23,5 \text{ N/mm}^2$	 $\max. f = 1,25 \text{ mm}$	$EE = 132,219 \text{ MJ}$ $OE = 0 \text{ MJ}$
	EG+Wind	 $\max. \sigma = 54,0 \text{ N/mm}^2$	 $\max. f = 10,85 \text{ mm}$	
adaptiv $d = 0,025 \text{ m}$ $E = 40.000 \text{ N/mm}^2$ $+ 50.560 \text{ N/mm}^2$	EG	 $\max. \sigma = 27,0 \text{ N/mm}^2$	 $\max. f = 1,51 \text{ mm}$	$EE = 113,981 \text{ MJ}$ $OE = 0 \text{ MJ}$
	EG+Wind	 $\max. \sigma = 74,9 \text{ N/mm}^2$	 $\max. f = 10,25 \text{ mm}$	$EE = 113,981 \text{ MJ}$ $OE = 1,2 \text{ MJ}$

Abbildung 6.19: Ergebnisgegenüberstellung passiv-adaptiv

Zudem kann neben der schlankeren Bauweise eine Erhöhung der Beulsteifigkeit der Schale realisiert werden; somit kann dem typischen Stabilitätsproblem von Schalentragsystemen lastsimultan begegnet werden (Abb. 6.15, obere Abbildungen).

6.5.2 Überprüfung der Funktionsmaterialeigenschaften und Sensorpositionierung

Neben der Untersuchung der statischen Eigenschaften der passiven und adaptiven Schalenstruktur sind vor allem die innerhalb der Gesamtstruktur anzuordnenden Funktionsmaterialien optimal zu positionieren. In Abb. 6.20 ist die Ausrichtung der Funktionsmaterialien in Faserbauweise entsprechend des untersuchten Lastfalls EG+Wind dargestellt. Aufgrund der unterschiedlichen Lasteinwirkungswinkel ist dennoch auf eine quasi-isotrope Ausrichtung zu achten.

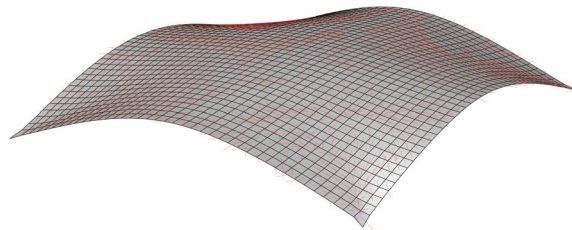


Abbildung 6.20: Variante Nr. II — optimierte Faseranordnung

Die in der bisherigen Analyse eingesetzten Funktionsmaterialien können unter Anwendung des Auswahltools *SMARTchoice* überprüft werden. Die adaptiven Parameter der Struktur sind wie folgt zu charakterisieren:

- max. Spannung $\sigma = \text{ca. } 75 \text{ N/mm}^2$
- max. Dehnung $\delta_{\text{aktiv}} = 1,7 \%$

Unter Anwendung der Abbildungen 2.7 und 2.5 kann festgestellt werden, dass der Einsatz von Formgedächtnislegierungen in Faserform für die vorliegende Anwendung aus Sicht der zu realisierenden Spannungen und Dehnungen möglich ist.

Die zuvor aufgezeigte Aktorik adaptiver Tragwerke bedarf einer geeigneten Mess- und Sensortechnik. Durch den Einsatz von Sensoren kann die Steuerung der Aktoren und somit die Struktureigenschaften in Abhängigkeit tatsächlich auftretender Belastungen positiv beeinflusst werden. Hierzu ist die optimale Positionierung der Sensoren und Aktoren auszulegen. In Abbildung 6.21 ist eine Anordnung von Sensoren in den Bereichen maximaler Strukturbewegung verdeutlicht. Die Vielzahl der Sensoren ist nach Teuffel [Teu04] aufgrund des geringen Kosteneinflusses vertretbar. Auf diese Weise besteht die Möglichkeit ein möglichst genaues Strukturverhalten messen zu können.

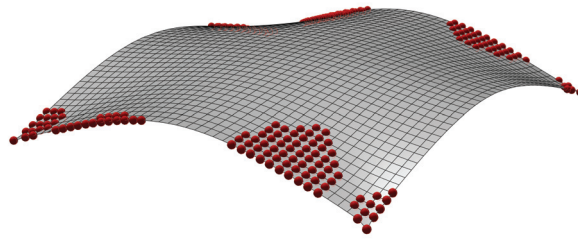


Abbildung 6.21: Variante Nr. II - Sensoranordnung

6.5.3 Weiterführende dynamischen Analysen

Die bisher durchgeführten Berechnungen und Optimierungen fokussieren die statische Analyse adaptiver Schalentragwerke. Im Nachfolgenden wird eine Erweiterung dieser Vorgehensweise im Hinblick auf dynamische Untersuchungen vorgestellt. Die parametrische Entwicklungsumgebung kann hinsichtlich einer dynamischen Erdbebenanalyse erweitert werden. Hierzu werden die Eigenfrequenzen des Schalenberechnungsmodells ermittelt und die Ergebnisse dieser Berechnung in die Programmierungsumgebung übertragen. Des Weiteren werden die Antwortspektren nach Norm (z. B. DIN EN 1998 [DIN10b]) implementiert, vgl. Abb. 6.22. Die ermittelten Eigenfrequenzen werden direkt in das Antwortspektrum übertragen und die resultierenden Erdbebenlasten können abgelesen und weitergehend genutzt werden. Zudem können verschiedene Strukturvarianten (Schalenhöhe, Material, Schalendicke) hinsichtlich ihrer Erdbebentragfähigkeit simultan zum Entwurf evaluiert werden. Ebenso können die adaptiven Steifigkeitseigenschaften variiert und die Auswirkungen auf die Erdbebentragfähigkeit ermittelt werden.

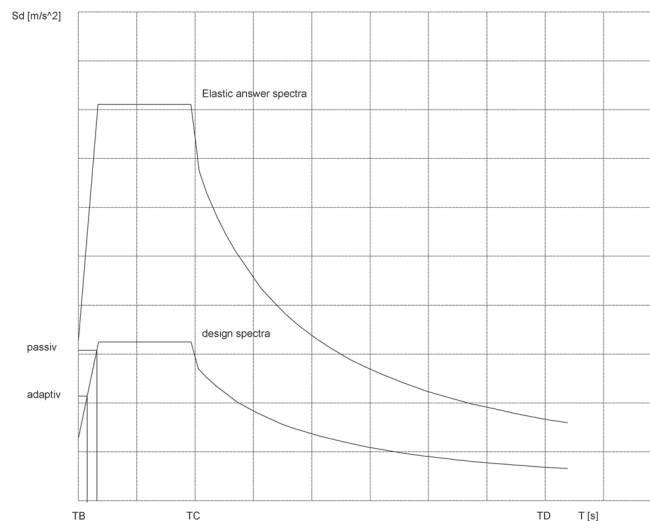


Abbildung 6.22: Adaptive Ertüchtigung hinsichtlich Erdbeben

6.6 Fazit

Adaptive Freiformfaserverbundschalentragwerke können mithilfe der Form- und Materialoptimierung als sehr nachhaltige Konstruktionen ausgebildet werden. Speziell die Möglichkeiten der Materialoptimierung in Form optimaler Faserverläufe ermöglicht ein großes Potenzial im Bereich der Materialeinsparung. Die auf diese Weise erzeugten filigranen Faserverbundkonstruktionen können durch die Integration adaptiver Fasermaterialien hinsichtlich leichtbautypischer Effekte (Schwingungs- und Verformungsverhalten) ertüchtigt werden.

Im Hinblick auf eine ganzheitliche Betrachtungsweise sind vor dem Hintergrund einer Ökobilanzierung nicht ausschließlich die direkt messbaren Materialaufwendungen (Volumen * Materialdichte) zu minimieren. Eine solche Untersuchung wird vielmehr hinsichtlich der Minimierung der Gesamtaufwendungen (*Embodied Energy*, *Operational Energy* usw.) durchgeführt.

Neben dem Aufzeigen der Einspar- und Optimierungsmöglichkeiten in Bezug auf die dargestellte Schalenstruktur kann die Anwendungsmöglichkeit des entwickelten parametrischen Gesamtmodells dargelegt werden.

Die gewonnenen Erkenntnisse bez. der Gleichung zur Ermittlung der zulässigen maximalen *Embodied Energy* für Funktionsmaterialien lässt sich auch auf Ansätze motorisch aktivierter Systeme (Fußpunktaktivierung) übertragen. Es wurde somit ein universeller Adaptivitäts-Nachhaltigkeitsbezug entwickelt.

Die in dieser Untersuchung herangezogenen Kennwerte von Funktionsmaterialien beziehen sich auf Formgedächtnislegierungen (eisenbasierte Formgedächtnislegierungen). Eine Übertragung auf weitere Materialgruppen, wie Piezokeramiken, kann z. B. auf Basis des Auswahltools *SMARTchoice*, des parametrischen Modells und der entwickelten Entwurfsmethode erfolgen.

Ein weiterer aufgezeigter Ansatzpunkt ist die Ertüchtigung adaptiver Strukturen hinsichtlich der Beulsteifigkeit und der Erdbebentragsfähigkeit. Diese Ansätze markieren einen Ausgangspunkt für weitergehende Arbeiten.

7 Anwendungsbeispiele

Die universelle Anwendbarkeit der parametrischen Arbeitsmethode im Hinblick auf die Planung adaptiver Tragwerke soll im Nachfolgenden an drei weiteren Anwendungsbeispielen kurz erläutert werden. Hierbei werden bewusst keine Faserverbundkonstruktionen vorgestellt, da diese in den vorangegangenen Abschnitten umfänglich diskutiert wurden. Es sollen vielmehr weiterführende Projekte aus dem umfangreichen Spektrum der Architektur und des Bauingenieurwesens vorgestellt werden. Die nachfolgenden Anwendungsbeispiele werden zunächst mithilfe einer einführenden Tabelle erläutert. Zudem kann die universelle Anwendbarkeit der entwickelten Entwurfsmethode verdeutlicht werden. Hierbei werden die Art der Konstruktion, die Art der adaptiven Steuerung und das Optimierungsziel erläutert.

Tabelle 7.1: Anwendungsbeispiele — Überblick

Beispiel-Nr. I Kap. 7.1	Art der Konstruktion	Stahlbetonschale
	adaptives Konzept	Shape-Memory-Alloy-Faserbewehrung
	stat.-konstr. Beschreibung	kontinuierliches Schalentragwerk
	Optimierungsziel	Minimierung Global Warming Potential
Beispiel-Nr. II Kap. 7.2	Art der Konstruktion	Holz-Hyparschalenkonstruktion
	adaptives Konzept	Adaptive Seilversteifung
	stat.-konstr. Beschreibung	Stabgitterschale
	Optimierungsziel	Minimierung Graue Energie + Erhöhung Steifigkeit
Beispiel-Nr. III Kap. 7.3	Art der Konstruktion	Stahl-Turmstruktur
	adaptives Konzept	Adaptive Seilversteifung im Fassaden- und Aussteifungsbereich
	stat.-konstr. Beschreibung	Stützen-Deckensystem
	Optimierungsziel	Minimierung Global Warming Potential + Erhöhung Steifigkeit

7.1 Adaptive Stahlbetonschale

7.1.1 Vorbemerkungen

Schalentragwerke in Stahlbetonbauweise können als sehr effiziente Tragwerke ausgebildet werden. Stahlbeton ist einer der am weitesten verbreiteten Werkstoffe im Bauwesen. Die Ausnutzung vorteilhafter adaptiver Eigenschaften wird in verschiedenen Untersuchungen [JCMR05; Jar11; APFV13; SKO⁺06] eingehend diskutiert. Hierbei kann gezeigt werden, dass das Verformungs- und Rissentwicklungsverhalten wesentlich verbessert werden kann. Bei der Entwicklung adaptiver Stahlbetonbauteile werden Formgedächtnislegierungsstäbe als Bewehrungsersatz bzw. als Ergänzung zu konventionellen Bewehrungsstäben im Verbund mit dem Beton eingesetzt. Diese Formgedächtnismaterialien werden dabei in unterschiedlichen Bauformen eingesetzt. So können stabförmige Elemente, ähnlich einem klassischen Bewehrungsstab, oder aber auch Kurzfaserelemente [MCBJ09], ähnlich einer Wirrfaserbewehrung im Faserverbundbau bzw. der Kurzfaserbewehrung im Betonbau, Anwendung finden. Die Ausrichtung der eingebrachten klassischen wie auch smarten Bewehrung ist unter Berücksichtigung der Hauptspannungsrichtungen anzuordnen. Die Ausrichtung der Kurzfaserbewehrung kann in Anlehnung an Ledderose und Kloft [LK14] über Magnetismus erfolgen.

Die Formgedächtnislegierungsfasern bzw. -stäbe können aufgrund der zwei möglichen einzunehmenden Zustände (Austenit und Martensit) eine Vorspannung auf Bauteile aufbringen. Dieses Verhalten eignet sich hervorragend für die Vorspannung von Schalentragwerken, da die Vorspannwirkung ohne das direkte Aufsetzen von Vorspannpresen erfolgen kann. Der Vorspannzustand kann allein durch das Ändern der elektrischen, thermischen bzw. magnetischen Zustände induziert werden.

7.1.2 Geometrie- und Berechnungsmodell

Die hier untersuchte beispielhafte adaptive Schalenstruktur greift die Untersuchungen aus Heidenreich et al. [HHR14a] auf. Die 4-Punkt-gelagerte Schale wird, vgl. Abb. 7.1, hinsichtlich einer möglichen Reduzierung des erforderlichen Treibhauspotenzials und einer Minimierung der auftretenden lastbedingten Verformungen analysiert und optimiert. Die Analyse in Bezug auf die Nachhaltigkeit kann bei der Berücksichtigung von Beton auf Basis der Daten entsprechend Tabelle 4.3 erfolgen.

$$\begin{aligned} \min. u_z &\in \mathbb{R} \\ \min. GWP &\in \mathbb{R} \end{aligned} \tag{7.1}$$

Für die geometrische Modellierung wird auf die Grundlagen entsprechend Kapitel 5 zurückgegriffen, wobei die Ablaufdiagramme entsprechend der Abb. 5.13 und 5.10 Anwendung

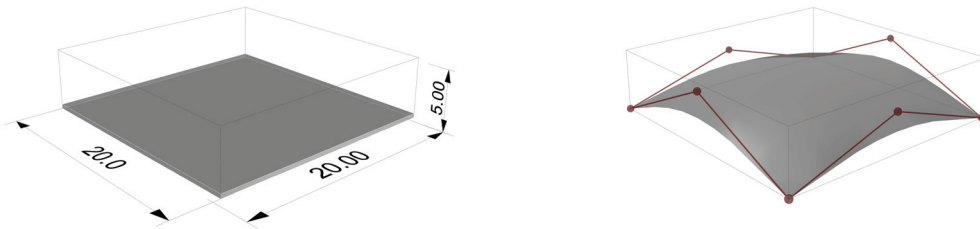


Abbildung 7.1: Adaptive Stahlbetonschale — Ausgangsgeometrie ([HHR14a]) und variable Geometrieparameter

finden. Auf dieser Basis kann das Berechnungs- und Formfindungsmodell aufgebaut werden. Das spezifische parametrische Untersuchungsmodell ist in Abb. 7.2 dargestellt.

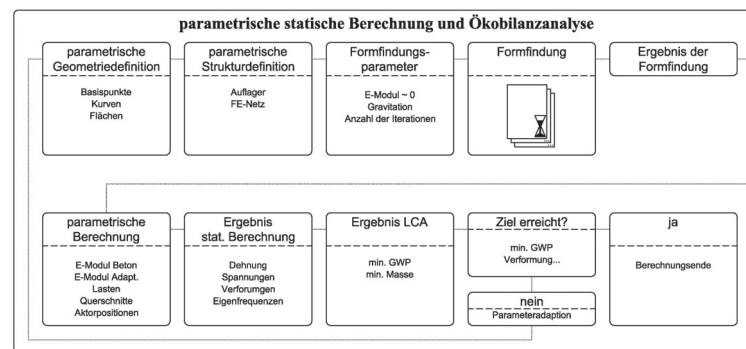


Abbildung 7.2: Adaptive Stahlbetonschale — parametrisches Untersuchungsmodell nach [HHR14a]

Das Schalentragswerk wird einer numerischen Formfindung unterzogen, wobei das Eigengewicht in vertikaler z-Richtung angesetzt wird, vgl. Abbildung 7.3. Nach Abschluss der Formfindung wird die Form als Ausgangsform für die Aufbringung der einzelnen Lasten herangezogen. Die Spannungen infolge Eigengewicht können auf diese Weise eliminiert bzw. minimiert werden.

Die Berechnung erfolgt unter Verwendung der entwickelten Schnittstellen und Entwurfsmethoden. Somit kommt für die Finite-Elemente-Berechnung *Sofistik* zum Einsatz. Für die Elementformulierung wird dementsprechend das ‘quad’-Elementmodell herangezogen. Die Materialmodellierung erfolgt unter Ansatz des Modells ‘BETO’, ein allgemeines Materialmodell für Betonbauteile. Neben der Verwendung reiner Stahlbetonformulierungen wird die Integration von Formgedächtnisstäben berücksichtigt. Hierbei wird auf Basis eines Verbundquerschnitts die effektive Gesamtsteifigkeit ermittelt, vgl. Formel (6.9). Die ermittelte Gesamtsteifigkeit wird als isotrope Steifigkeit den Elementen zugewiesen. Für die FGL-Bewehrungsstäbe werden Kennwerte nach Abdulridha [APFV13] herangezogen.

Im Anschluss an die Formfindung erfolgt die vergleichende Berechnung in Form einer konventionellen Stahlbetonschale und eines adaptiv ertüchtigten Schalentragswerkes. Die

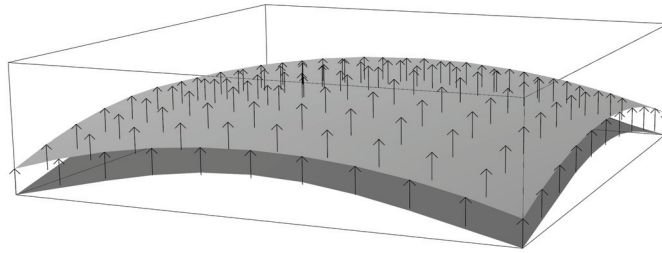


Abbildung 7.3: Adaptive Stahlbetonschale — Formfindung

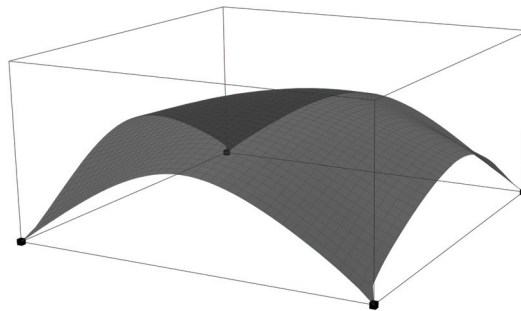


Abbildung 7.4: Adaptive Stahlbetonschale — Ergebnis der Formfindung

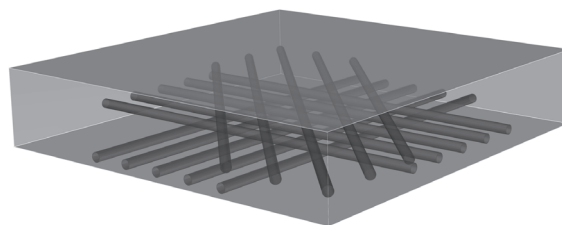


Abbildung 7.5: Adaptive Stahlbetonschale — FGL-Stäbe als Bewehrung

entsprechenden Materialeigenschaften werden den Elementen zugewiesen. Auf diese Weise kann das Elementmodell ‘BETO’ weiterhin berücksichtigt werden. Zudem können die zeitlich invarianten Eigenschaften der FGL-Stäbe Anwendung finden und die Auswirkung auf die Gesamttragwirkung ermittelt werden. Diese Vorgehensweise ist im Rahmen einer frühen Entwurfsphase sehr gut anwendbar. In weiterführenden Untersuchungen sollte das Materialmodell unter Berücksichtigung der zeitlich varianten FGL-Eigenschaften erweitert werden.

7.1.3 Berechnung und vereinfachte Nachweise

Nach der einheitlichen Formfindung wird jeweils sowohl eine mit konventioneller Bewehrung als auch eine unter Anwendung smarter Bewehrungsmaterialien (FGL) konstruierte Variante untersucht. Die Berechnung der Schalenstruktur erfolgt unter den Lastansätzen des Eigengewichts zuzüglich einer gleichmäßig verteilten Last von ($g = 1,5 \text{ kN/m}^2$) und einer Windlast ($w = 1,0$ bzw. $0,5 \text{ kN/m}^2$), vgl. hierzu Abbildung 7.6. Aufgrund der zu erwartenden Verformungen wird eine Berechnung nach Theorie III. Ordnung durchgeführt. Die Stahlbetonschale wird in Anlehnung an [HHR14a] in normalfestem Beton berechnet, da normalfeste Betone häufig im Hinblick auf das Treibhauspotenzial günstiger als hochfeste Betone abschneiden [HHR14a], [HHR⁺14b].

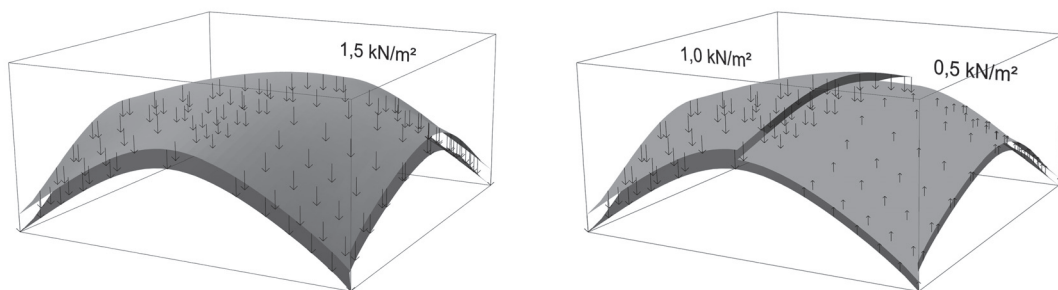


Abbildung 7.6: Adaptive Stahlbetonschale — Belastung

In Abb. 7.7 und Tabelle 7.2 sind die wesentlichen Ergebnisse der statischen und dynamischen Berechnung der Schalenstruktur zusammengefasst. Die Variante aus reinem Stahlbeton stellt dabei die Konstruktion mit der geringsten Steifigkeit dar. Die Steifigkeit der Stahlbetonvariante lässt sich unter Einsatz smarter Materialien bei geringerer Bauteilstärke erzielen und sogar übertreffen.

7.1.4 Fazit

Das vorliegende Beispiel der adaptiven Stahlbetonschale verdeutlicht inwieweit Einspar- und Ertüchtigungspotenziale im Bereich des Einsatzes smarter Materialien als Bewehrungsmaterialersatz bzw. als ergänzende Bewehrungsmaterialien geeignet sind. Die hierbei

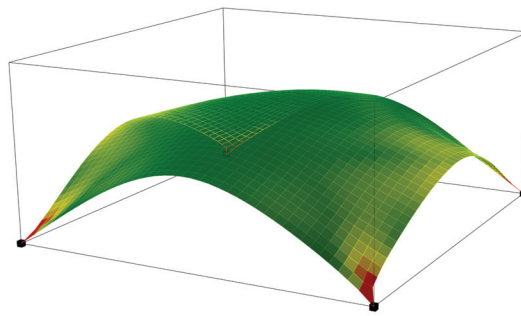


Abbildung 7.7: Adaptive Stahlbetonschale — Spannungsauswertung

Tabelle 7.2: Adaptives Schalentragswerk — Berechnungsergebnisse

Kriterium	Stahlbetonschale	Adapt. Stahlbetonschale
Schalenstärke [cm]	13 cm	12 cm
Material [-]	C30/37 mit Bewehrungsstahl	C30/37 mit FGL-Bewehrungsstahl
1. Eigenfrequenz [Hz]	1,83 Hz	2,02 Hz
Auslastung [-]	1,34	0,95
Treibhauspotenzial [GWP in kg]	12.213,8	11.274,3

erzielbare Reduzierung der Schalenstärke geht somit mit einer Verringerung der Bauteilmasse einher, was für die Auflagersituation und anschließende Bauteile sehr vorteilhaft sein kann. Trotzdem kann die Bauteilsteifigkeit weiterhin garantiert werden. Die ermittelte Verringerung des Treibhauspotenziales ist unter dem Vorbehalt der Hinzurechnung der Aufwendungen infolge des Einbaus der Formgedächtnislegierungen zu sehen. Die derzeit ermittelte Differenz kann als Aufforderung an die Industrie verstanden werden, FGL-Materialien mit geringem Treibhauspotenzial zu entwickeln. Ein Ansatz kann hierbei die Verwendung eisenbasierter Formgedächtnislegierungen darstellen, vgl. [JCMR05].

7.2 Adaptive Hyparschalenkonstruktion

7.2.1 Vorbemerkungen

Im Sommersemester 2009 wurde mit dem Screenhaus.SOLAR, vgl. Abb. 7.8, an der Bauhaus-Universität Weimar im Rahmen eines studentischen Projektes eine filigrane Holzschalenkonstruktion in Form eines hyperbolischen Paraboloids entwickelt und realisiert, vgl. Ruth und Gump [RG10]. Das Screenhaus.SOLAR folgt den Ansprüchen an ein temporäres Bauwerk.



Abbildung 7.8: Screenhaus.SOLAR [RG10]

Hyperbolische Paraboloiden zeichnen sich dadurch aus, dass sie in jedem Punkt eine gegensinnige Krümmung aufweisen. Die Form einer solchen Schalenkonstruktion kann nach Marti ([Mar12], S. 612) geometrisch wie folgt beschrieben werden:

$$z = f \frac{xy}{ab} \quad (7.2)$$

Die Membranspannungen der hyperbolischen Paraboloiden können entsprechend nachfolgenden Formeln ermittelt werden ([Mar12], S. 612-613). Aufgrund der Lastabtragung über Membranspannungszustände können große Spannweiten bei sehr geringen Bauteilstärken ausgeführt werden.

$$n_{xy} = -\frac{qab}{2f}, \quad n_x = \sqrt{\frac{a^2b^2 + y^2f^2}{a^2b^2 + x^2f^2}} \cdot \frac{d^2f_2}{dy^2}, \quad n_y = \sqrt{\frac{a^2b^2 + x^2f^2}{a^2b^2 + y^2f^2}} \cdot \frac{d^2f_1}{dx^2} \quad (7.3)$$

Der Form eines hyperbolischen Paraboloids in Stahlbetonbauweise bedient sich Felix Candela bei der Entwicklung der *Chapel Lomas de Cuernavaca*, vgl. Abb. 7.9. Für die notwendige Schalung kommen hierbei Holzstäbe bzw. -balken mit aufliegenden Schalungsplatten

zum Einsatz. Die verwendeten Schalungstafeln wirken so zum einen als Betonieroberfläche für den Beton aber auch als aussteifende Elemente für die Schalungsform.

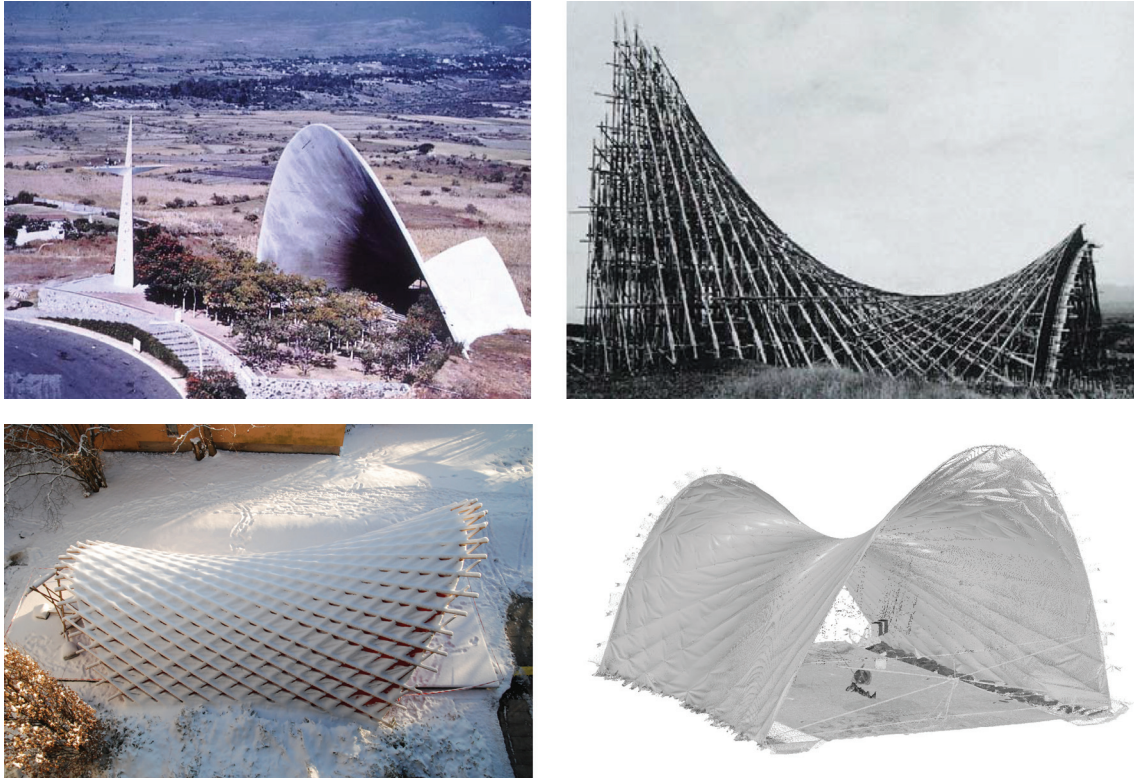


Abbildung 7.10: Screenhaus.SOLAR — Laservermessung unter Schneebelastung (links: Ruth und Gump [RG10], rechts: Jörg Braunes (Professur InfAr — Informatik in der Architektur, Bauhaus-Universität Weimar))

Das Screenhaus.SOLAR wird gegenüber klassischen hyperbolischen Paraboloidschalen als aufgelöste Konstruktion realisiert und auf ihre erzeugenden Geraden reduziert. Eine steife Dachscheibe findet somit keine Anwendung. Die gegenläufigen Erzeugenden bilden trapezförmige Vierecke, welche verschiebungsanfällig sind. Den auftretenden Verformungen wird mittels Einpressdübeln im Kreuzungspunkt der Holzlatten entgegengewirkt. Des Weiteren werden diagonal verlaufende Stahlseile eingebaut. Auf diese Weise können die Vierecke in stabile Dreiecke unterteilt werden. Die Gesamtstruktur der Hyparschale verformt sich nur geringfügig infolge gleichmäßig verteilter Belastungen. Jedoch zeigt die Struktur ein ausgeprägtes Verformungsverhalten infolge halbseitiger Belastungen, z. B. Windlasten. Im Rahmen des Projektes kann gezeigt werden, dass die Verwendung der Stahlseile zu einer signifikanten Versteifung der Struktur in vertikaler wie auch in horizontaler Richtung führt. Die Versteifung der Struktur kann durch den Einsatz adaptiver Seile weiter verbessert werden, vgl. Ruth et al. [RGH12]. Die Steifigkeit dieser Seile kann in Abhängigkeit auftretender Verformungen und Schwingungen angepasst werden, wobei ein entsprechendes Monitoringsystem zum Einsatz kommt. Hierbei können sowohl Laservermessungen, vgl. Abb. 7.10, als auch systemintegrierte Messungen zum Einsatz kommen.

7.2.2 Geometrie- und Berechnungsmodell

Die Untersuchungen der Struktur basieren auf einem parametrischen Gesamtmodell, vgl. Abschnitt 5.1.3. Die notwendigen Erweiterungen, um den Anforderungen eines FE-Modells gerecht zu werden, basieren auf den Spezifikationen und der Syntax des Programmsystems *Sofistik*. In Abbildung 7.11 ist das geometrische CAD-Modell sowie das auf Basis des parametrischen Modells erzeugte Finite-Elemente-Modell dargestellt. Das parametrische Untersuchungsmodell ist in Abb. 7.12 aufgeführt.

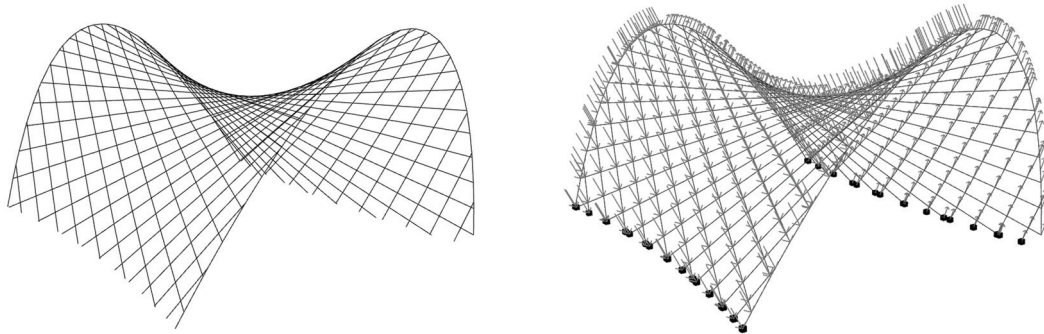


Abbildung 7.11: Screenhaus.SOLAR — Geometrie (links) und FE-Modell mit Windbelastung (rechts)

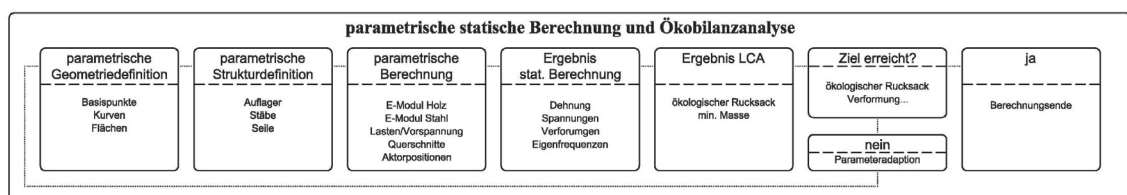


Abbildung 7.12: Screenhaus.SOLAR — parametrisches Untersuchungsmodell

Die Modellierung der Stabelemente erfolgt unter Anwendung der *Sofistik*-spezifischen 'STAB'-Elementformulierung. Dieses Elementmodell bildet Druck-, Zug- und Biegebelastung ab. Die Definition erfolgt über die Anfangs- und Endknoten. Ebenso ist die Achse zwischen Anfangs- und Endknoten als positive x-Achse bezeichnet. Die Seile werden mit dem Elementtyp 'SEIL' von *Sofistik* beschrieben. Auch bei diesen Elementen wird die Achse zwischen Anfangs- und Endknoten als positive x-Achse bezeichnet, vgl. [AG13]. Für die einzelnen Bauteile werden entsprechende Materialmodelle hinterlegt. So werden die Holzlatten mit dem Modell 'HOLZ' von *Sofistik* angesprochen. Bei der Verwendung von Holz als Werkstoff ist es wichtig die Faserrichtung und Einbaulage zu beachten. Für die Seile werden die Elementformulierungen 'STAH' bzw. 'MATE' von *Sofistik* herangezogen. Die im Modell angesetzten Materialkennwerte sind in den Tabellen 7.3 und 7.4 zusammengefasst.

Die Analyse des screenhaus.SOLAR erfolgt unter Berücksichtigung verschiedener Lastansätze. So werden zum einen die Eigengewichte der Konstruktion zuzüglich einer geringen Auflast infolge der Membrandachhaut von $0,16 \text{ kN/m}^2$ (LF1) betrachtet. Des Weiteren

Tabelle 7.3: Adaptive Hyparschalenkonstruktion — Materialparameter, Holzstäbe C24, [AG13]

Eigenschaften	Einheit	Wert
Elastizitätsmodul, E	[N/mm ²]	11.000
anisotroper E-Modul, E90	[N/mm ²]	370
Schubmodul, G	[N/mm ²]	690
Schubmodul, G90	[N/mm ²]	123
Biegefestigkeit, $f_{m,0}$	[MPa]	24,00
Zugfestigkeit, $f_{t,0}$	[MPa]	14,00
Zugfestigkeit, $f_{t,90}$	[MPa]	0,40
Druckfestigkeit, $f_{c,0}$	[MPa]	21,00
Druckfestigkeit, $f_{c,90}$	[MPa]	2,50
Schubfestigkeit, f_v	[MPa]	4,00
Schubfestigkeit, $f_{v,T}$	[MPa]	4,00
Schubfestigkeit, $f_{v,pl}$	[MPa]	4,00
Biegefestigkeit, $f_{m,90}$	[MPa]	24,00

Tabelle 7.4: Adaptive Hyparschalenkonstruktion — Materialparameter, Stahlseile S235, [AG13]

Eigenschaften	Einheit	Wert
Elastizitätsmodul, E	[N/mm ²]	210.000
Schubmodul, G	[N/mm ²]	81.000
Zugfestigkeit, f_t	[MPa]	360
Druckfestigkeit, f_c	[MPa]	360

fließt die Belastung infolge Wind in die Berechnungen ein. Hierbei ist von einer temporären Standzeit auszugehen. Die reduzierte Windlast ergibt sich nach DIN EN 13782 (LF 2). In Tabelle 7.5 sind die Lastansätze aufgeführt.

7.2.3 Berechnung und vereinfachte Nachweise

Bei der Berechnung des screenhaus.SOLAR werden verschiedene Bemessungsstrategien verfolgt. Diese sind im Forschungsbericht von Ruth et. al [RGH12] dargelegt. So wird die Struktur in einer ersten Variante als klassische passive Struktur berechnet. Hierbei sind die Grenzzustände der Tragfähigkeit als auch der Gebrauchstauglichkeit unter alleiniger Berücksichtigung der Steifigkeitsparameter der Bauteile zu erfüllen (Bemessungsvariante Nr. 1).

In einer zweiten Bemessungsvariante (Bemessungsvariante Nr. 2) wird die Struktur für

Tabelle 7.5: Belastungen Screenhaus.SOLAR

Lastfall	Wert	Symmetriebetrachtung
LF 1 (g)	$g + 0,16 \text{ kN/m}^2$	symmetrisch
LF 2 (w)	$0,24 \text{ kN/m}^2$ bzw. $0,15 \text{ kN/m}^2$	halbseitig (DIN EN 13782) [DIN13]

die häufigsten Lastfälle (Eigengewicht) hinsichtlich der Erfüllung der Grenzzustände der Tragfähigkeit dimensioniert. Die Bemessung für die Windlasten erfolgt demgegenüber unter Ansatz einer adaptiven Ertüchtigung. Speziell die dabei zu beachtenden Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit sollen auf diese Weise adaptiv gesteuert und sichergestellt werden. Die hierfür notwendige Steifigkeit wird nach Teuffel [Teu04] nicht über Querschnittsfläche und Material sondern über zugeführte Energie erreicht.

Bemessungsvariante Nr. 1

Die Bemessungsvariante wird unter den Maßgaben einer temporären Konstruktion analysiert. Es kommen hierbei die Belastungsansätze Eigengewicht (LF 1) und Windlast (LF 2) zum Tragen. Die Konstruktions- und Querschnittsabmessungen sind in Abbildung 7.13 verdeutlicht.

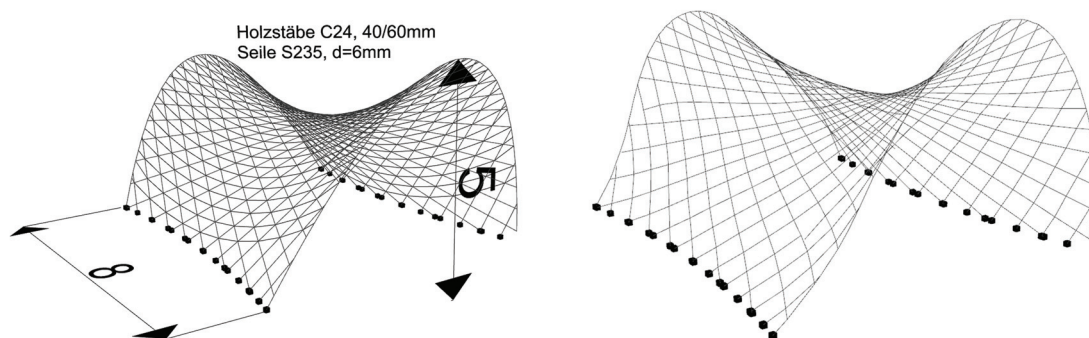


Abbildung 7.13: Screenhaus.SOLAR - Bemessungsvariante Nr. 1 — Konstruktions- und Querschnittsabmessungen und verformte Struktur

Die Bemessung dieser Variante ergibt eine maximale Auslastung der Bauteile in Höhe von 61 %; somit ist der Nachweis infolge des Grenzzustandes der Tragfähigkeit erfüllt. Die Verformungsberechnung ergibt eine maximale Verformung in vertikaler Richtung von 27,6 mm, diese Verformung entspricht einer zulässigen Verformung von $f = \frac{l}{200} = 35$ mm.

In Abbildung 7.14 ist der von Ruth und Gump [RG10] ermittelte ökologische Rucksack für das Screenhaus.SOLAR nach der Bemessungsvariante Nr. 1 und flächenidentischen Vergleichskonstruktionen dargestellt.

Die Nachweise des GZT und GZG können als ausreichend betrachtet werden. Im Bereich der 'kleinen' Öffnung wird ein weiteres Aussteifungselement angeordnet, vgl. Abbildung 7.15. Dieses verringert die Verformungen und Schwingungen zusätzlich.

Bemessungsvariante Nr. 2

Die Bemessungsvariante Nr. 2, vgl. Abb. 7.16, kann als weiterführende Optimierungsvariante der Bemessungsvariante Nr. 1 verstanden werden. Hierbei werden ebenso die Lastfälle Eigengewicht (LF 1) und Windlast (LF 2) berücksichtigt. Die Erfüllung der Grenzzustände

Screenhaus.SOLAR - ECOLOGICAL BACKPACK (data sheet)

material	Screenhaus.SOLAR		double garage (reinforced concrete)		double garage (brickwork)	
	weight [t]	ecological weight [t]	weight [t]	ecological weight [t]	weight [t]	ecological weight [t]
wood	0,52	7,72	-	-	-	-
reinforcement	-	-	1,18	85,08	0,84	60,72
steel	0,20	14,46	-	-	-	-
reinforced concrete	-	-	63,00	300,76	35,00	167,09
brickwork	-	-	-	-	8,96	70,40
membrane (PTFE)	0,18	86,77	-	-	-	-
roof sealing (PE)	-	-	0,11	225,19	0,11	225,19
ton	0,90	108,95	64,29	611,03	44,91	523,40

weight of construction ecological backpack

Abbildung 7.14: Screenhaus.SOLAR — ökologischer Rucksack [RG10]

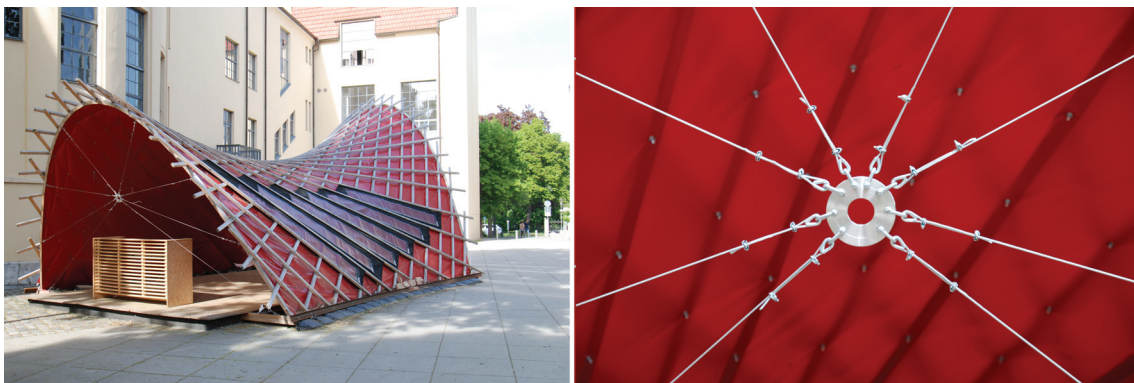


Abbildung 7.15: Screenhaus.SOLAR — Aussteifungselemente (re. Foto: Philipp in [RHP12])

der Gebrauchstauglichkeit sollen unter Anwendung adaptiver Materialien im Bereich der Seilverspannung erzielt werden. Im Rahmen der adaptiven Optimierung werden Lösungen gesucht, welche die Notwendigkeit des Einsatzes der 'Versteifungsspinne' negieren. Eine Möglichkeit stellt hierbei die Erzeugung einer adaptiven Vorspannwirkung im Bereich der Seilelemente dar. Diese kann durch eine Verkürzung der Seilelemente erzielt werden. So können beispielsweise Smart Materials Anwendung finden. Im Folgenden wird eine geeignete Vorspannwirkung und entsprechende Seillängenänderung ermittelt. Hierbei sollen die möglichen Grenzwerte adaptiver Materialien Berücksichtigung finden, vgl. Abschnitt 2.2.3.

Die angesetzte Vorspannung fließt als eigenständiger Lastfall in die Berechnung ein. Auf diese Weise können die Auswirkungen auf das Verformungsverhalten der Struktur direkt ermittelt werden. Die aufgebrachte Vorspannung ist in Abbildung 7.17 dargestellt. Die Größe der Vorspannung ist in Abhängigkeit von den auftretenden Spannungen in den einzelnen Spannseilen gewählt. Die ermittelte Verkürzung wurde mit 0,18 % ermittelt, vgl. Abb. 7.17. Diese Größenordnung kann von sämtlichen Smart Materials realisiert werden, vgl. [JCMR05; Paw06] und Kapitel 2.2.2. Vor allem der geringe Bauteildurchmesser von 6 mm eignet sich für die Anwendung von Formgedächtnislegierungen, da vor allem sehr schlanke Bauteile einer zügigen Aktivierungs- bzw. Deaktivierungszeit unterliegen [JCMR05]. Bei der Verformungsanalyse sind vor allem die Strukturverformung in y-Richtung (quer zum Gebäude) und in z-Richtung (vertikal) von Interesse. Hierzu werden exemplarische Knotenpunkte der Struktur analysiert und ausgewertet, vgl. Abb. 7.16. In Abb. 7.18 kann gezeigt werden, dass eine Optimierung des Verformungsverhaltens möglich ist. Des Weiteren kann das Gesamtverformungsverhalten gegenüber Bemessungsvariante Nr. 1 auf 21 mm ($f_{zul} = \frac{1}{300} = 23 \text{ mm}$) verbessert werden. Dies entspricht 28 % Verbesserung gegenüber der passiven Ausgangsvariante. Um eine optimale Aktivierung der Struktur gewährleisten zu können, sind entsprechende Sensoren vorzusehen. In Abb. 7.19 sind ermittelte optimale Einbauorte für Verformungs- und Beschleunigungssensoren verdeutlicht. Hierbei wird die Struktur sowohl exemplarischen Vertikal- wie auch Horizontallasten ausgesetzt und die Strukturantwort ausgewertet. Die einzelnen Berechnungsergebnisse können direkt in das CAD-Modell übertragen werden. Somit können eventuelle Formänderungen und -optimierungen weiterbearbeitet und geometrisch geprüft werden.

7.2.4 Zuschnitt der Membrandachhaut

Das Screenhaus.SOLAR ist mit einer Membrandachhaut versehen, vgl. Abb. 7.8. Die Herstellung der Membran basiert auf einer Generierung der Zuschnittflächen, vgl. Abb. 7.20. Die einzelnen Schnittmuster können direkt aus dem verwendeten parametrischen Gesamtsystem generiert werden. Im vorliegenden Fall wird das FE-Modell hinsichtlich der Zuschnittberechnung 'TEXTILE' des FE-Systems *Sofistik* erweitert. Die ermittelten Einzelflächen werden dabei in das CAD-System übertragen und weiterverarbeitet. Auf diese Weise kann der Zuschnitt unter Anwendung einer geschlossenen computergestützten Prozesskette erfolgen.

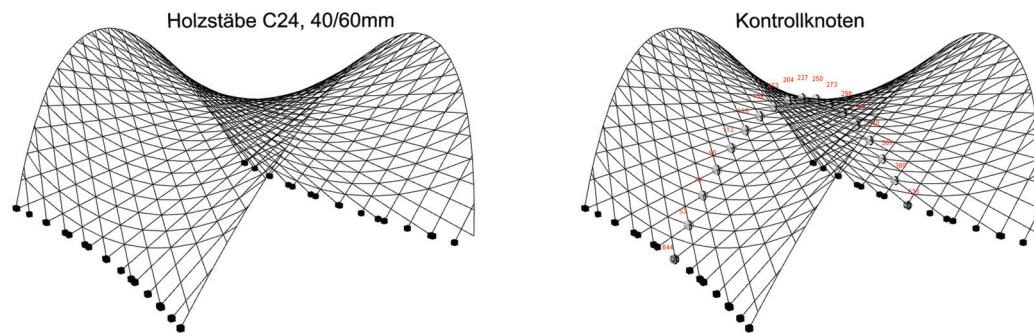


Abbildung 7.16: Screenhaus.SOLAR — Bemessungsvariante Nr. 2, Geometrie und Kontrollknoten

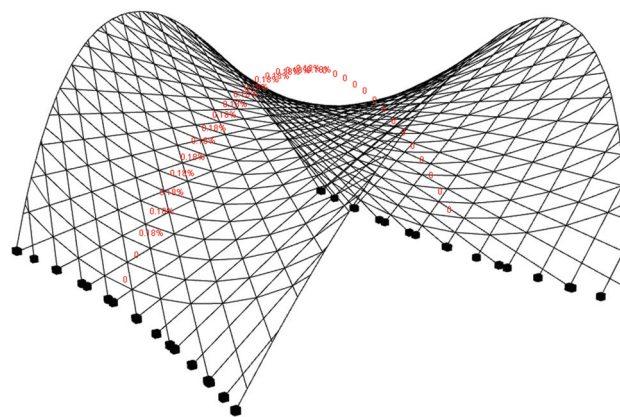


Abbildung 7.17: Screenhaus.SOLAR — Bemessungsvariante Nr. 2, Darstellung der aufgetragenen Vorspannung

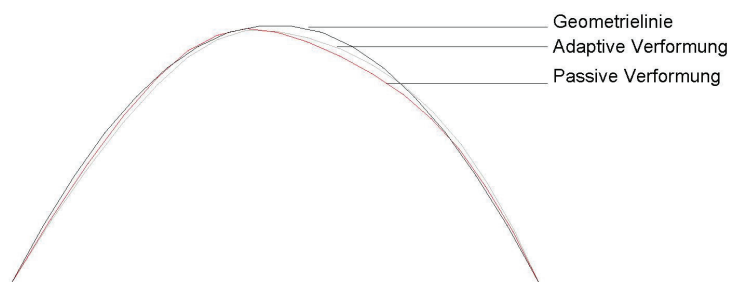


Abbildung 7.18: Screenhaus.SOLAR — Bemessungsvariante Nr. 2, Darstellung der Verformungslinien der Kontrollknoten

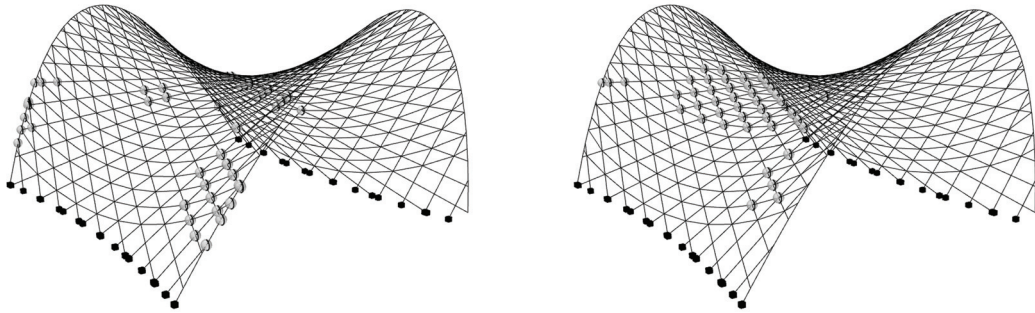


Abbildung 7.19: Screenhaus.SOLAR — Bemessungsvariante Nr. 2, Sensorpositionen (max. Verformung in y- (links) und in z-Richtung (rechts))

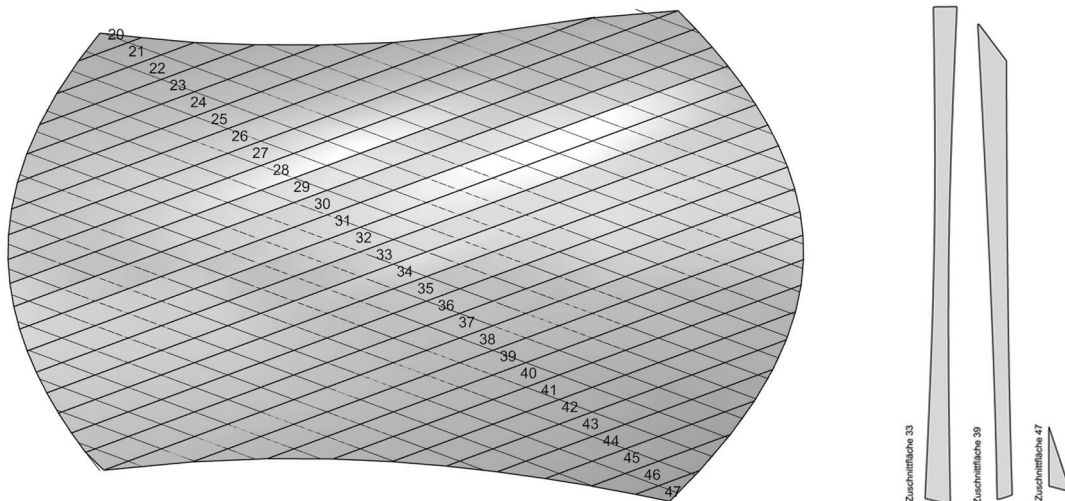


Abbildung 7.20: Screenhaus.SOLAR — Bemessungsvariante Nr. 2, Zuschnittflächen

7.2.5 Fazit

Das screenhaus.SOLAR beschreibt als Hyparschalenkonstruktion eine sehr filigrane und materialsparende Bauweise. Aufgrund dieser sehr leichten Ausführung treten jedoch die besonderen Eigenschaften der Verformungs- und Schwingungsanfälligkeit zutage. Die Optimierung dieser Struktur unter den gegebenen Randbedingungen kann durch den Einsatz parametrischer Werkzeuge sinnvoll unterstützt werden. Vor allem können aufgrund von Planungsänderungen angepasste Randbedingungen im Geometriemodell, dem Berechnungsalgorithmus und der Nachweisführung Berücksichtigung finden. Die weitergehende Optimierung der Struktur verdeutlicht im Speziellen die Möglichkeiten der Berücksichtigung der Steifigkeitserhöhung durch adaptive Materialien, also durch eingetragene Energie. Somit kann die Steifigkeit im Moment des Lasteinflusses aktiviert und anschließend wieder deaktiviert werden. Die Anwendung der aufgrund der Screenhaus.SOLAR-Geometrie gekrümmt verlaufenden adaptiven Seilelemente in Gebäudelängsrichtung bieten die Möglichkeit der Steifigkeitserhöhung. Diese Steifigkeitserhöhung wirkt sich auch auf die Gebäudequerrichtung positiv aus. Das schalentypische Verformungs- und Schwingungsverhalten kann positiv beeinflusst, jedoch nicht komplett eliminiert werden. Die aufgezeigte digitale Prozesskette umfasst neben der geometrischen Modellierung, der statischen Berechnung und der adaptiven Ertüchtigung auch die Zuschnittgenerierung. Das Screenhaus.SOLAR ist mit biegeweichen Solar-Dünnschichtmodulen zur autarken Energiegewinnung ausgestattet. Die erzeugte Energie kann in das öffentliche Stromnetz eingespeist oder lokal gespeichert werden. Die Zuschnittgenerierung der Membran für die Dachhaut kann für zukünftige Aufgaben auf den Zuschnitt exakt passender photovoltaischer Dünnschichtmodule erweitert und somit eine energieerzeugende Dachhaut realisiert werden. Zudem kann die erzeugte Energie für die Aktivierung der adaptiven Seilelemente herangezogen werden. Ein autarker, adaptiver Betrieb des Gebäudes ist auf diese Weise möglich.

7.3 Adaptive Fassaden- und Aussteifungskonstruktion

7.3.1 Vorbemerkungen

Die Möglichkeiten der adaptiven Steifigkeits- und Verformungssteuerung offerieren auch im Hinblick auf Fassaden- und Aussteifungssysteme ein großes Potenzial. So werden zunehmend schlankere, materialminimierte Glasfassadenstrukturen entwickelt, welche besonders hinsichtlich windinduzierter Schwingungen und Verformungen untersucht werden müssen. So ist beispielsweise das Empfangsgebäude der Universität Bremen, vgl. Abb. 7.21, mit einer seilverspannten Glasfassade ausgestattet, wobei die Seile durch Federelemente kontinuierlich gespannt werden. Auf diese Weise werden die Verformungen und Schwingungen im Bereich der Glaskonstruktion minimiert [SW01]. Dies ist vor allem im Hinblick auf das Verformungs- und Bruchverhalten des Materials Glas notwendig.



Abbildung 7.21: seilverspannte Fassade des Eingangsgebäudes der Universität Bremen [Stö01]

Aber auch die Dimensionierung der Aussteifungselemente zur Abtragung von Horizontallasten soll vor allem bei kompakten Gebäudestrukturen aufgrund der Platzverhältnisse im Verhältnis zum Gesamtgrundriss möglichst wenig Fläche einnehmen. Beim Eiermuseum 'Wander Bertoni' [Cza11] in Winden am See in Österreich, vgl. Abbildung 7.22, wird auf eine konsequente Reduzierung der Anzahl und der Abmessungen der Aussteifungselemente geachtet.



Abbildung 7.22: Eiermuseum Winden am See nach Fertigstellung und Schnitt [Cza11]

Dieses Gebäude wird als Ausstellungsgebäude genutzt und ist zweigeschossig aufgebaut. Das obere Geschoss ist weitestgehend geschlossen und kann als ausgesteift bezeichnet werden. Das Obergeschoss ruht auf zwei im Erdgeschoss schräg angeordneten Stützen und einer Stahltreppe. Diese drei Elemente verdeutlichen die minimale Anzahl an Aussteifungselementen, da eine steife Dachscheibe vorhanden ist, vgl. Abb. 7.23. Eine Ertüchtigung der aussteifenden Wirkung bei gleichzeitiger Reduzierung der horizontalen Verformungsanfälligkeit kann durch die Anordnung vertikal verlaufender Stahlseile in der Fassadenebene erfolgen.

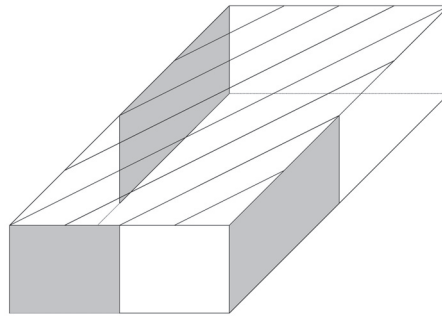


Abbildung 7.23: Aussteifungsgrundsystem

Beide zuvor aufgezeigten Konzepte können durch die Anwendung adaptiver Strukturtechnologien weiterentwickelt werden. So können die Fassadenseilelemente durch die Anwendung adaptiver Elemente in Abhängigkeit auftretender Verformungen und Schwingungen einer Steifigkeitserhöhung unterzogen werden. Dabei kann zum einen die Verformungen der Glasfassade als auch die Gesamtverformung der Struktur reduziert werden. Im Nachfolgenden wird diese Vorgehensweise an einem Beispiel konzeptionell verdeutlicht.

7.3.2 Geometrie- und Berechnungsmodell

Das beispielhafte Konzeptmodell greift die zuvor genannten Grundprinzipien der 'Minimierung der Aussteifungselemente' als auch der 'seilbasierten Fassadenvorspannung' auf. Als Referenzobjekt wird ein temporärer Versuchsbau für bauphysikalische, bauklimatische und statische bzw. dynamische Untersuchungen herangezogen, vgl. Abbildung 7.24. Das Untersuchungsobjekt ist eine Gemeinschaftsentwicklung der Professur Tragwerkslehre und der Forschungsgruppe Green Efficient Building (FOGEB) [Rut15] an der Bauhaus-Universität Weimar.

In Abbildung 7.25 ist die geplante Tragkonstruktion verdeutlicht. Es handelt sich um ein zweigeschossiges Objekt, wobei die obere Ebene durch massive Wandkonstruktionen großflächig geschlossen ist und als ausgesteift bezeichnet werden kann. Im Erdgeschoss sind biegesteif angeschlossene Eckstützen vorgesehen.

Im Fortfolgenden wird die vorgestellte Grundstruktur hinsichtlich der Integration eines adaptiven Fassaden- und Aussteifungssystems weiterentwickelt. Auf diese Weise werden die

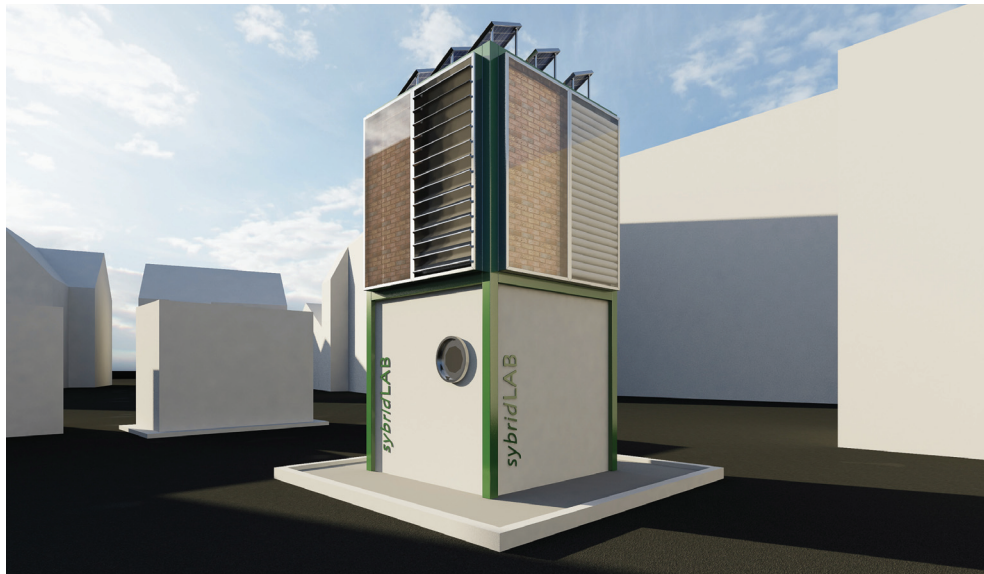


Abbildung 7.24: Versuchsbau, Isometrie (Alexander Hollberg, Bauhaus-Universität Weimar, FOGEB)

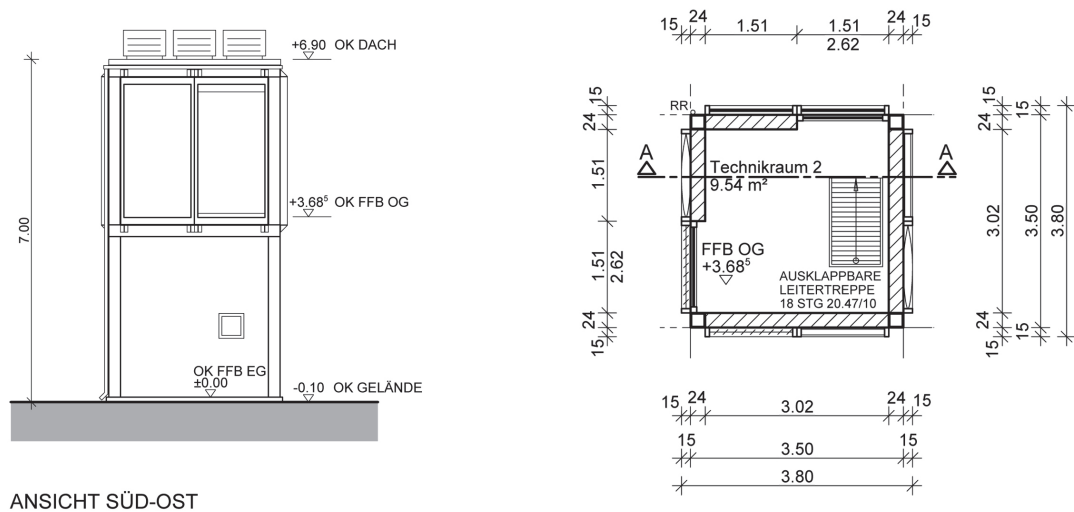


Abbildung 7.25: Versuchsbau, Grundriss und Schnitt (Sandra Fuchs, Bauhaus-Universität Weimar, FOGEB)

Konzepte des Eiermuseums in Winden und des Universitätsgebäudes in Bremen in Kombination eingesetzt. Die geometrische Modellierung erfolgt unter Nutzung eines parametrischen Gesamtmodells, vgl. Abschnitt 5.1.3. Es können verschiedene Geometrievarianten erzeugt und anschließend durch Erweiterung hinsichtlich eines Finite-Elemente-Modells analysiert werden. Der parametrische Ansatz ist speziell dadurch begründet, dass eine optimale Anordnung der schräg gestellten Stützen sowie auch korrespondierende Steifigkeits- und Materialeigenschaften ebenso wie die Vorspannung der Seilelemente ermittelt werden müssen. Das auf die vorliegende Anwendung angepasste parametrische Untersuchungsmodell ist in Abb. 7.27 aufgeführt.

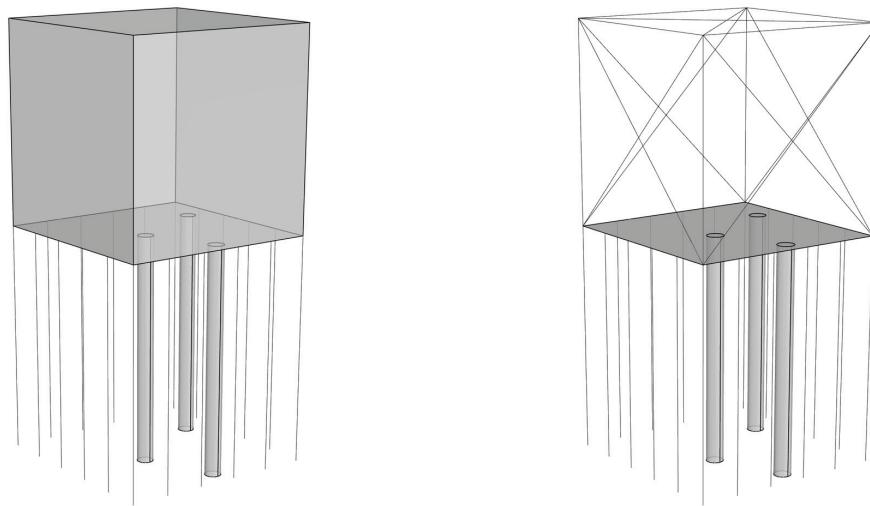


Abbildung 7.26: Versuchsbau, parametrisches Geometriemodell (links), FE-Modell

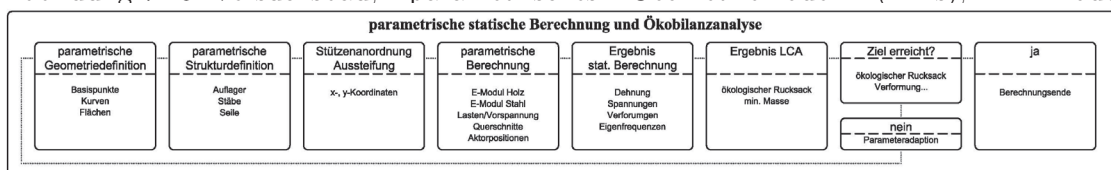


Abbildung 7.27: Versuchsbau — parametrisches Untersuchungsmodell

In Abbildung 7.26 ist das parametrisch erzeugte Geometrie- und Berechnungsmodell dargestellt. Die rechnerische Umsetzung erfolgt mit der Finite-Elemente-Programmssoftware *Sofistik*. Bei der Modellierung der einzelnen Elemente finden sowohl Flächenelemente wie auch Stab- bzw. Seilelemente Anwendung. Hierbei werden die entsprechenden Elementformulierungen ('quad', 'STAB' und 'SEIL') der *Sofistik*-Software herangezogen. In Abb. 7.26 wird zudem deutlich, dass die steife Ausführung des Obergeschosses in Form von Auskrenzungen simuliert wird. Auf diese Weise wirkt das komplette Obergeschoss als kompakter 'Würfel'.

Tabelle 7.6: Versuchsbau — Materialparameter, Stahlbetondecke C30/37

Eigenschaften	Einheit	Wert
Elastizitätsmodul, E	$[N/mm^2]$	31.939
Querdehnzahl	$[-]$	0.20
Schubmodul, G	$[N/mm^2]$	13.308
Kompressionsmodul	$[N/mm^2]$	17.774
Wichte, g	$[kN/m^3]$	25.0
Temperaturkoeffizient, α	$[1/K^{-1}]$	1.00E-05
Rechenfestigkeit, f_c	[MPa]	25.50
Nennfestigkeit, f_{ck}	[MPa]	30.00
Zugfestigkeit, f_{ctm}	[MPa]	2.90

Tabelle 7.7: Versuchsbau — Materialparameter, Stahlstützen und -seile S235

Eigenschaften	Einheit	Wert
Elastizitätsmodul, E	$[N/mm^2]$	210.000
Schubmodul, G	$[N/mm^2]$	81.000
Zugfestigkeit, f_t	[MPa]	360
Druckfestigkeit, f_c	[MPa]	360

Den einzelnen Bauteilen können zudem unterschiedliche Materialeigenschaften zugewiesen werden. So wird die Decke zwischen Erdgeschoss und Obergeschoss als Stahlbetondecke geplant. Hier findet die Materialbeschreibung 'BETO' von *Sofistik* Anwendung. Die Stützen in beiden Geschossen werden als Stahlstützen simuliert und mit der Materialbeschreibung 'STAH' beschrieben. Die Seilelemente werden sowohl in Stahlbauweise als auch als adaptive Seilelemente berücksichtigt. Es werden die Seilelemente vereinfachend mit einer Vorspannungswirkung beaufschlagt. Auf diese Weise können effektive adaptive Seileigenschaften eruiert werden. Die für die Berechnung des Versuchsbaus angesetzten Materialkennwerte sind den Tabellen 7.6 und 7.7 zu entnehmen.

Für die statische Analyse des Versuchsbaus werden unterschiedliche Belastungsansätze und Belastungssituationen berücksichtigt. So wird zum einen das Eigengewicht der Konstruktion aufgebracht (LF 1). Das Eigengewicht wird über die Materialparameter und die Querschnittsabmessungen automatisch generiert. In diesem Lastfall finden zudem die aufgrund der Modellierungsvariante des steifen Obergeschosses in Form von Auskreuzungen vernachlässigten Lasten äquivalent als Einzel- bzw. Linienlasten entsprechende Berücksichtigung. Des Weiteren wird der Dach- bzw. Deckenaufbau pauschal mit $1,00 \text{ kN/m}^2$ berücksichtigt. Als zweiter Lastfall (LF 2) findet die Windlast nach DIN EN 1991-1-4 [DIN10a] Anwendung. Diese wird als Druck- bzw. Sogbelastung auf die Fassadenelemente aufgebracht. Die Lastverteilung ist in Abb. 7.28 verdeutlicht.

Die berücksichtigte Verkehrslast (LF 3), vgl. Abb. 7.29, wird im Obergeschoss gleichmäßig verteilt angenommen. Eine schachbrettartige Verteilung kann wegen der geringen Größe des Objektes vernachlässigt werden.

Infolge der parametrischen Modellierung und Berechnung ergibt sich ein vielfältiger Un-

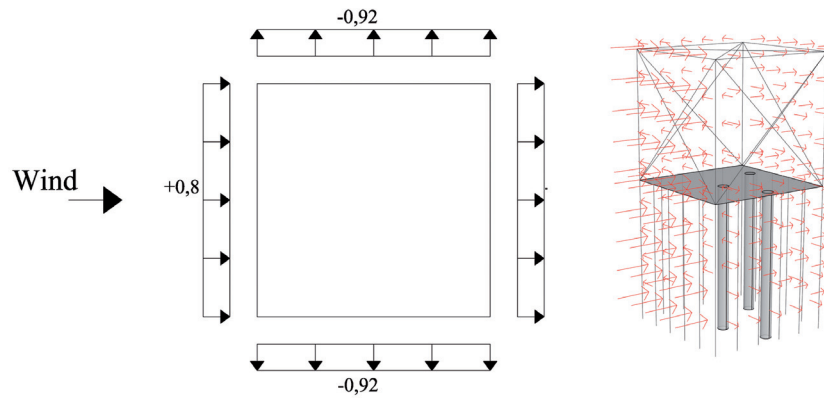


Abbildung 7.28: Versuchsbau — LF2 'Wind'

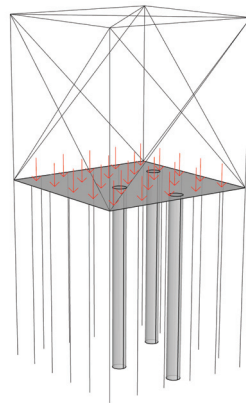


Abbildung 7.29: Versuchsbau — LF3 'Nutzlast'

Tabelle 7.8: Belastungsannahmen

Lastfall	Wert	Anordnung
LF 1 (g)	$g + 1,00 \text{ kN/m}^2$	symmetrisch
LF 2 (w)	$0,65 \text{ kN/m}^2$	Druck- bzw. Sogbelastung
LF 3 (q)	$2,00 \text{ kN/m}^2$	gleichmäßig verteilte Anordnung

Tabelle 7.9: Parametervariation

Stützenstellung	
Deckenanbindung (x-, y-Koordinaten)	veränderlich
Bodenplattenanbindung (x-, y-Koordinaten)	veränderlich
Hauptstützen	
Außendurchmesser	veränderlich
Wandstärke	veränderlich
Fassadenseile	
Durchmesser	veränderlich
Vorspannung	veränderlich
E-Modul	veränderlich
Belastung	
Windlast	konstant
Nutzlast	konstant

tersuchungsraum, vgl. Tabelle 7.9.

7.3.3 Berechnung und vereinfachte Nachweise

Der gezeigte Versuchsbau wird auf Basis des zuvor beschriebenen parametrischen Geometrie- und Finite-Elemente-Modell-Ansatzes optimiert. Die Optimierung wird unter verschiedenen Gesichtspunkten durchgeführt. Es werden statisch und dynamisch relevante Anforderungen hinsichtlich des Grenzzustandes der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit als auch die Aspekte der Nachhaltigkeit berücksichtigt. Bei der statischen Analyse werden neben der Überprüfung der zulässigen Spannungen der einzelnen Bauteile vor allem die Verformungen in horizontaler Richtung (u_x und u_y) als praxisnaher Indikator für die Struktursteifigkeit ermittelt. Die Aspekte der lebenszyklusgerechten Ausführung (Kapitel 4), welche die alleinige Betrachtung leichter und materialsparender Tragwerke bei Weitem übertrifft, werden im Rahmen der Optimierungsaufgabe formuliert und berücksichtigt. Somit kann die Optimierungsaufgabe als multikriterielles Optimierungsproblem formuliert werden:

$$\begin{aligned}
 &\min \text{ GWP} \\
 &\min. u_x \text{ bzw. } \min. u_y \\
 &\text{Nebenbedingung: } \sigma_{\text{vorh.}} < \sigma_{\text{zul.}}
 \end{aligned}$$

Zur Lösung dieser Optimierungsaufgabe kann ein Optimierungsalgorithmus Anwendung finden, welcher mehrere Kriterien berücksichtigen kann, vgl. Abschnitt 3.5. So kann beispielsweise der Optimierungsalgorithmus *HypE* von Bader und Zitzler [BZ08] herangezogen werden.

Die Lösung dieser Optimierungsaufgabe erfolgt unter Anwendung der Ansätze einer parameterbasierten Lebenszyklusanalyse, vgl. Abschnitt 5.1.4. Hierbei ist entsprechend den Abbildungen 5.11 und 5.10 das Geometriemodell so zu erweitern, dass eine statische bzw.

dynamische Analyse vorgenommen werden kann, vgl. Abschnitt 7.3.2. Im vorliegenden Fall sind die Umweltwirkungsindikatoren für die verwendeten Materialien Stahl und Stahlbeton, vgl. Abschnitt 4 und Tabellen 4.3 und 4.4, anzuwenden.

Die Ergebnisse der vielfältigen Optimierungsvarianten sind in Abbildung 7.30 zusammengefasst. Die Darstellung in Form einer Pareto-Front ermöglicht die Darstellung sämtlicher Strukturvarianten. Hierbei stellen alle Varianten mögliche, aber nicht unbedingt optimale Ergebnisse dar. Die Besonderheiten multikriterieller Optimierungen bestehen darin, dass es nicht möglich ist ein Kriterium zu verbessern, ohne gleichzeitig die Erfüllung eines anderen Kriteriums zu verschlechtern. In den Abbildungen 7.30 und 7.31 werden sechs exemplarische Optima herausgefiltert. Es ist erkennbar, inwieweit infolge unterschiedlicher Stützenstellungen und Stützensausbildungen (Durchmesser und Wandstärke) das Treibhauspotenzial (GWP) einer Struktur reduziert werden kann, wobei zugleich sich die Steifigkeit der Struktur ändert. Zudem ist erkennbar, dass die sich einstellenden Stützenanordnungen in die drei Raumrichtungen ausrichten, vgl. Abbildungen 7.32 und 7.23.

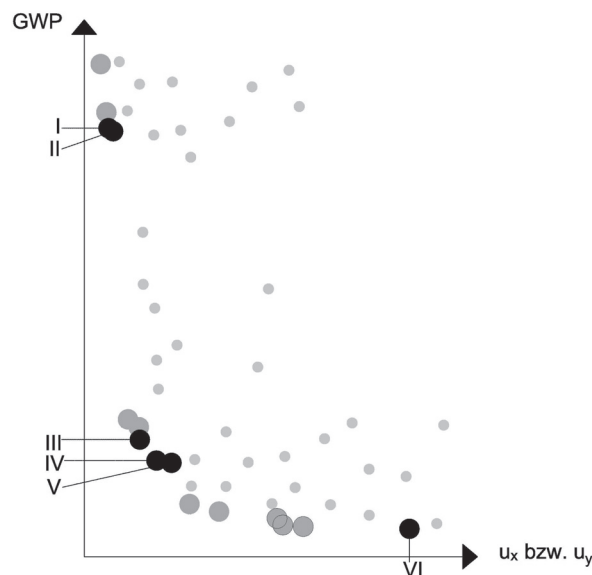


Abbildung 7.30: Ergebnisse der multikriteriellen Optimierung (Pareto-Front)

Im Anschluss erfolgt eine adaptive Ertüchtigung der bereits optimierten Struktur. Nun wird die zuvor ermittelte *Variante III* weitergehend analysiert. Auf Basis der sich infolge der einwirkenden Belastungen einstellenden Verformungen werden jene Fassadenseile analysiert, welche in Bezug auf das Verformungs- und Schwingungsverhalten maßgebenden Einfluss haben. Diese Seile werden einer zusätzlichen Vorspannung unterzogen, wobei die zulässigen Materialkennwerte smarter Materialien Berücksichtigung finden, vgl. Abschnitt 2.2.2. In Abbildung 7.33 sind die ermittelten und angewendeten Vorspannkennwerte dargestellt. Hierbei wird deutlich, dass eine Optimierung gegenüber der nicht adaptiv gesteuerten Variante um ca. 19 % zu erzielen ist.

Neben der Ertüchtigung der Aussteifungskonstruktion und der damit verbundenen Steifigkeitserhöhung in Form von Schwingungs- und Verformungsreduzierung kann auch die

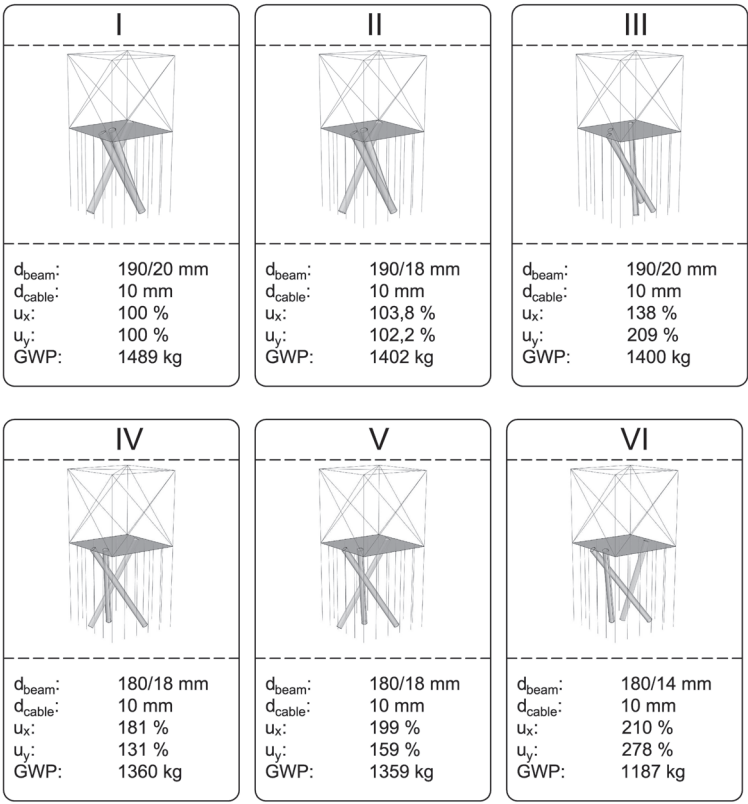


Abbildung 7.31: ausgewählte Ergebnisse und Strukturvarianten

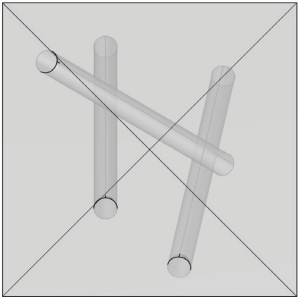


Abbildung 7.32: Aussteifung in drei Raumrichtungen

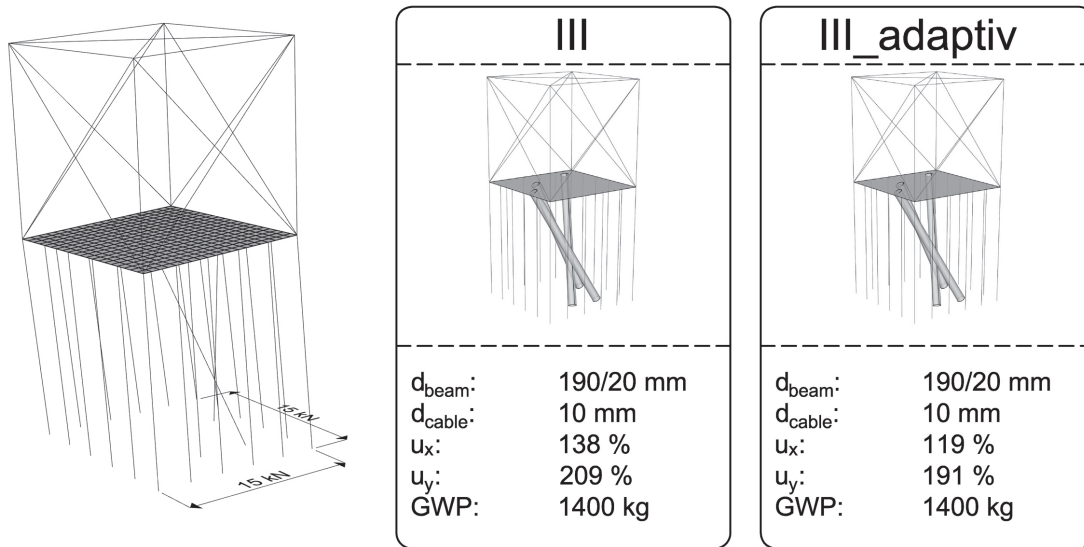


Abbildung 7.33: adaptive Ertüchtigung der Variante III

Seilsteifigkeit für die Halterung der Glasscheiben im Erdgeschoss ertüchtigt werden. Auf diese Weise können die Glasfassaden schlanker dimensioniert werden. Zudem sind im Bereich der Anschlussprofile geringere Fugenabstände in Bezug auf die Verformungen zu berücksichtigen.

7.3.4 Fazit

Die vorgestellte entwickelte Variante dieses Versuchsbaus verdeutlicht eine weitere Anwendungsmöglichkeit adaptiver Systeme im Bauwesen. Die hier präsentierte Variante einer adaptiven Fassadenkonstruktion kann als verformungsminimierendes Element im Bereich filigraner Glasfassaden zum Einsatz kommen. Außerdem kann die Schwingungsanfälligkeit des Gesamtaussteifungssystems reduziert werden. Da die aussteifende Wirkung des hier angewendeten Aussteifungssystems infolge des Auftretens von Nutzlasten im Obergeschoss reduziert werden kann, ist die Aufbringbarkeit der Vorspannung unmittelbar bei Lasteneintritt von großem Interesse. Die Vorspannung muss dabei nicht dauerhaft wirken, was die Möglichkeit des Auftretens von Materialschäden minimieren kann. Diese Vorgehensweise ermöglicht eine materialschonende Ausführungsvariante des Versuchsbaus.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Materialoptimierte wie auch an die auftretenden Belastungen angepasste Tragwerke gewinnen vor dem Hintergrund knapper werdender Ressourcen und gesteigerter Nachhaltigkeitsansprüche zunehmend an Bedeutung. Faserverbundschalentragwerke vereinen diese Tendenzen hervorragend in einem System. Auf formgebender Ebene werden dabei verschiedene Formfindungsmethoden angewendet und auf materieller Ebene erfolgt eine Kombination und Anordnung unterschiedlicher, der Belastung entsprechenden Materialien. Die auf diese Weise entwickelten materialsparenden Tragwerke können Vorbildern der Natur und technischer Systeme folgend durch die Integration adaptiver Systeme weitergehend ertüchtigt werden. Speziell in Bezug auf die Schwingungs- und Verformungsanfälligkeit klassischer Schalentragwerke ermöglicht die Betrachtung der Adaptivität ein enormes Potenzial der Leistungssteigerung, welches mit noch schlankeren Bauteilen und einer freien Formensprache einhergeht.

Die vorliegende Arbeit stellt eine Entwurfsmethode für adaptive Tragwerke vor, welche in frühen Entwurfsphasen angewendet werden kann. So können wesentliche entwurfsrelevante Informationen ermittelt und Entscheidungen zu einem Zeitpunkt getroffen werden, bei dem Änderungen bereits maximale Auswirkungen bei gleichzeitig minimalem Aufwand haben. Die hierzu notwendigen vielschichtigen, ganzheitlichen Analysen werden über ein gemeinsames parametrisches Gesamtmodell gekoppelt. Sämtliche Informationen werden in diesem Modell erfasst, verwaltet und die einzelnen Analyseprogramme angesteuert. Das Gesamtmodell vereint auf parametrischer Basis die Geometrieerzeugung, die Formoptimierung, die Materialoptimierung und Bauteildimensionierung und die Ermittlung optimaler Aktor- und Sensorpositionierungen. Auf diese Weise kann eine verlustfreie und schnelle Daten- und Informationsübertragung gewährleistet werden. Das entwickelte und vorgestellte Modell basiert auf State-Of-the-Art- bzw. Open-Source-Software-Applikationen. Dadurch besteht die Möglichkeit, eigenständige Erweiterungen zu entwickeln und die einzelnen Programmsysteme miteinander zu vernetzen. Durch die Anwendung standardisierter Software können die Vorteile der Softwarewartung und -aktualisierung genutzt werden. Des Weiteren können, vor allem aus tragwerksplanerischer Sicht, die durchgeführten Berechnungsergebnisse direkt für die Genehmigungs- und Ausführungsstatik herangezogen werden. Eine zeitintensive Neumodellierung und -berechnung entfällt.

Innerhalb der entwickelten und auf dem parametrischen Gesamtmodell basierenden Entwurfsmethode fokussiert die vorliegende Arbeit im Speziellen die besonderen Aspekte adaptiver Schalentragwerke in Faserverbundbauweise aus tragwerksplanerischer Sicht. Die

hierbei entwickelte Entwurfsmethode ermöglicht die Auslegung materialminimierter Schalenträgerwerke. Das Schalenoptimierungsverfahren basiert auf einem aus numerischen Formfindungsverfahren, statischer Berechnung, Aktor- und Sensorpositionierung bestehenden mehrstufigen Prozess, welcher unter Berücksichtigung verschiedener Optimierungsaspekte durchgeführt werden kann. Dieser Prozess wird am Beispiel einer freigeformten Faserverbundschalenstruktur veranschaulicht. Die Schale soll unter Anwendung verschiedener Kriterien optimiert werden. So ist das Materialgewicht und die Schalenstärke zu reduzieren; gleichzeitig soll die Spannungsverteilung möglichst homogen ausfallen und vor allem die Minimierung des Verformungs- und Schwingungsverhaltens erzielt werden. Die Berücksichtigung dieser Kriterien erfordert eine multikriterielle Optimierung. Die anzuwendende Entwurfsmethode muss dieser Forderung entsprechen. Die in der Schale angeordneten Sensoren und Aktoren können in ihrer Lage optimiert und in der Anzahl minimiert werden. Hierbei erfolgt stets ein Abgleich mit zulässigen Spannungen bzw. Dehnungen der Aktoren (Smart Materials), wobei die eigens entwickelte SMARTchoice-Matrix zum Einsatz kommt.

Auf Basis der Grundlagen von Lebenszyklusanalysen erfolgt eine nachhaltige Betrachtung von Schalenträgerwerken im Allgemeinen und von adaptiven Tragwerken im Besonderen. Hierbei kann herausgearbeitet werden, dass infolge einer Aktivierung adaptiver Tragwerke eine Optimierung des Tragverhaltens möglich ist. Zudem kann die Minimierung der Bauteilabmessungen erzielt und damit einhergehend eine Reduzierung der im Bauteil gebundenen Energie (*Embodied Energy*) erreicht werden. Dabei ist die Betrachtung der Nachhaltigkeit um den infolge der Aktivierung aufzubringenden Energieaufwand (*Operational Energy*) zu erweitern. In der vorliegenden Arbeit wird ein Ansatz zur Definition zulässiger Ökobilanzkennwerte von Smart Materials auf Basis der Energiedifferenz zwischen einer passiven und einer adaptiven Struktur vorgestellt. Anhand dieser Kennwerte kann die Entwicklung zukünftiger Smart Materials unter dem Aspekt der ganzheitlichen Nachhaltigkeit erfolgen.

Die Allgemeingültigkeit und Übertragbarkeit auf weitere Tragsysteme im Bauwesen und speziell andere Materialkonstellationen werden anhand einer adaptiven Stahlbetonschale, einer in Stäben aufgelösten adaptiven Hyparschalenkonstruktion und eines Versuchsbaus in Form eines speziellen Fassaden-Aussteifungssystems verdeutlicht. Es kann gezeigt werden, dass auch bei diesen Konstruktionen die Materialstärke bzw. das Gewicht reduziert werden können. Die erzielbaren Gewichtsvorteile sind darauf zurückzuführen, dass die notwendige Steifigkeit bei adaptiven Tragwerken nicht durch eine höhere Bauteilstärke und somit höheres Gewicht erzielt wird. Es besteht vielmehr die Möglichkeit der Steifigkeitserhöhung infolge induzierter Energie. Diese Gewichtsersparnis wird vor dem Hintergrund der ganzheitlichen Nachhaltigkeitsbetrachtung diskutiert.

Ausblick und Anregungen für weiterführende Arbeiten

Die im Rahmen der vorliegenden Arbeit dargelegten Untersuchungen und erarbeiteten Grundlagen zeigen vielfältige weitere Aufgaben- und Fragestellungen für fortführende wissenschaftliche Arbeiten im Bereich adaptiver Tragwerke auf.

Adaptiven Faserverbundschalentragwerken kann unter Berücksichtigung der Leistungsfähigkeit aus tragwerksplanerischer Sicht ein großes Potenzial zugesprochen werden. Jedoch sind in weiterführenden Arbeiten die Kriterien der Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit weiter zu spezifizieren. So sind die ermittelten ökologischen Kennwerte durch Versuche zu belegen und gegebenenfalls neue Materialsysteme zu entwickeln. Hierbei bietet die Betrachtung der zulässigen nachhaltigen Aktivierungsenergie (Δ_{Energy}) als Differenz zwischen der strukturelbundenen Energie (*Embodied Energy*) und der notwendigen Aktivierungsenergie (*Operational Energy*) eine wesentliche Grundlage zur Entwicklung ökologisch vertretbarer smarter Materialsysteme. Dies sollte vor allem vor dem Hintergrund der notwendigen Abnahmemengen im Bauwesen erfolgen.

Die erweiterte Betrachtung der Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit adaptiver Freiformflächentragwerke gilt es zu spezifizieren. In diesem Zusammenhang ist der besonderen Berücksichtigung der notwendigen Herstellungsverfahren Beachtung zu schenken.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden die Smart Materials unter Ansatz ihrer zeitlich invarianten Materialeigenschaften modelliert. Weiterführend kann eine Berücksichtigung der zeitlichen Varianz diskutiert werden.

Die in der vorliegenden Arbeit betrachteten Aspekte zur Beulsteifigkeit adaptiver Tragwerke und das hierbei gezeigte Potenzial kann hinsichtlich der Allgemeingültigkeit und Übertragbarkeit geprüft werden.

Des Weiteren zeigen in der aktuellen Planungslandschaft BIM-Modelle (Building Information Modeling) häufiger großes Potenzial beim vernetzten Arbeiten. In diesem Zusammenhang ist das entwickelte parametrische Gesamtmodell auf die Erweiterbarkeit von BIM-Systemen oder die Integration in derartige Systeme bzw. Modelle zu prüfen.

Die vorgestellte Methode ermöglicht die Vorauslegung adaptiver Tragwerke in frühen Entwurfsphasen. In folgenden Arbeiten sollte die Stabilität des Modells bei der Übertragung auf weitere Aufgabenstellungen geprüft werden. Hierbei sind im Besonderen evolutionäre Algorithmen und der daraus resultierende Ergebnisvergleich zu betrachten und diskutieren.

Der Entwurf adaptiver Freiformschalentragwerke erfordert eine enge Zusammenarbeit aller beteiligter Fachplaner und eine gegenüber konventionellen Tragwerken grundlegend andere Herangehensweise bei der Planung. Die erzielbaren Leistungssteigerungen ermöglichen sehr schlanke Bauwerke.

Literaturverzeichnis

- [ABHW14] ADRIAENSSENS, Sigrid ; BARNES, Mike ; HARRIS, Richard ; WILLIAMS, Chris: Dynamic relaxation. In: ADRIAENSSENS, Sigrid (Hrsg.) ; BLOCK, Philippe (Hrsg.) ; VEENENDAAL, Diederik (Hrsg.) ; WILLIAMS, Chris (Hrsg.): *Shell Structures for Architecture: Form Finding and Optimization*. Routledge Chapman & Hall, 2014, S. 89–101
- [ABVW14] ADRIAENSSENS, Sigrid (Hrsg.) ; BLOCK, Philippe (Hrsg.) ; VEENENDAAL, Diederik (Hrsg.) ; WILLIAMS, Chris (Hrsg.): *Shell Structures for Architecture: Form Finding and Optimization*. Routledge Chapman & Hall, 2014
- [Ada15] ADAPTRONIK, Fraunhofer A.: *Was ist Adaptronik?* Website, Mai 2015. – Available online at http://www.adaptronik.fraunhofer.de/de/adaptronic/what_is.html; visited on May 30th 2015.
- [Add14] ADDIS, Bill: Physical modelling and form finding. In: ADRIAENSSENS, Sigrid (Hrsg.) ; BLOCK, Philippe (Hrsg.) ; VEENENDAAL, Diederik (Hrsg.) ; WILLIAMS, Chris (Hrsg.): *Shell Structures for Architecture: Form Finding and Optimization*. Routledge Chapman & Hall, 2014, S. 33–43
- [AG13] AG, SOFiSTiK: *ASE Allgemeine Statik Finiter Element Strukturen*. Ober-schleissheim, 2013
- [AJK⁺95] AMOS, F. ; JUNG, K. ; KAWETZKI, B. ; KUHN, W. ; PERTLER, O. ; REISSING, R. ; SCHAAL, M: Abschlussbericht der Projektgruppe Genetische Algorithmen / Universität Stuttgart. 1995. – Forschungsbericht
- [AL11] ALTHAUS, Hans-Jörg ; LEHMAN, Martin ; EMPA MATERIAL SCIENCE AND TECHNOLOGY (Hrsg.): *Ökologische Baustoffliste (Version 2.2e)*. Überlandstraße 129 8600 Dübendorf (CH): Empa Material Science and Technology, 01.Januar 2011
- [APFV13] ABDULRIDHA, Alaa ; PALERMO, Dan ; FOO, Simon ; VECCHIO, Frank J.: Behavior and modeling of superelastic shape memory alloy reinforced concrete beams. In: *Engineering Structures* 49 (2013), S. 893–904
- [AS05] ADDINGTON, M. ; SCHODEK, D.: *Smart Materials and Technologies for the architecture and design professions*. New York : Elsevier Architectural Press, 2005

- [Ash99] ASHBY, Michael F.: *Materials Selection in Mechanical Design*. Butterworth Heinemann, 1999
- [AW04] AL-WAHAB, Muhammed A.: *Neue Aktorsysteme auf Basis strukturierter Piezokeramik*, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Diss., 2004
- [Bas00] BASCHE, A.: Piezo-Aktoren: Physikalische Grundlagen - Arbeitsprinzipien - Anwendungsbereiche / HTW des Saarlandes. 2000. – Diskussionspapier
- [Bb14] BAU-ÜBERWACHUNGSVEREIN (Hrsg.): *Tragende Kunststoffbauteile Entwurf-Berechnung-Konstruktion*. Springer Vieweg Verlag, 2014
- [BFF11] BLETZINGER, Kai-Uwe ; FISCHER, Michael ; FIRL, Mattias: Simulationsmethoden für Optimierung und Kontrolle formadaptiver, leichter Flächentragwerke. In: HOFSTETTER, Günter (Hrsg.) ; BEER, Gernot (Hrsg.) ; THEINER, Yvonne (Hrsg.) ; DÜNSER, Christian (Hrsg.): *Baustatik-Baupraxis 11*, 2011, S. 41–48
- [BFH03] BURBLIES, Andreas ; FRICKE, Dr. H. ; HENNIGS, Dr. D.: Rückführung von optimierten Strukturen in den Entwicklungsprozess. In: *FEM-, CFD-, und MKS Simulation* (2003), S. 36–41
- [BGT10] BOLLINGER, Klaus ; GROHMANN, Manfred ; TESSMANN, Oliver: Digitale Tragwerksplanung. In: HAUSCHILD, Mortz (Hrsg.) ; KARZEL, Rüdiger (Hrsg.): *Digitale Prozesse Planung, Gestaltung, Fertigung*. Institut für Internationale Architektur-Dokumentation, 2010, S. 72–73
- [BGW⁺10] BOLLINGER, Klaus ; GROHMANN, Manfred ; WEILANDT, Agnes ; WAGNER, Michael ; WALTHER, René ; SANTINI, Gilbert ; AH, Stefan von: Das ROLEX Learning Center der EPFL in Lausanne. In: *Beton- und Stahlbetonbau - Ernst- und Sohn Verlag* 105 (2010), S. 248–259
- [Ble90] BLETZINGER, Kai-Uwe: *Formoptimierung von Flächentragwerken*, Universität Stuttgart Institut für Baustatik, Diss., 1990
- [Bol00] BOLLER, C.: Smarte Werkstoffe und Strukturen und ihre Anwendung in der Luft- und Raumfahrt. In: *Stahlbau - Ernst- und Sohn Verlag* 69 (2000), S. 556–567
- [BR14] BLETZINGER, Kai-Uwe ; RAMM, Ekkehard: Computational form finding and optimization. In: ADRIAENSSENS, Sigrid (Hrsg.) ; BLOCK, Philippe (Hrsg.) ; VEENENDAAL, Diederik (Hrsg.) ; WILLIAMS, Chris (Hrsg.): *Shell Structures for Architecture*. Routledge Chapman & Hall, 2014, S. 45–55
- [BS04] BENDSOE, Martin P. ; SIGMUND, Ole: *Topology Optimization Theory, Methods, and Applications*. 2nd. Springer Verlag, 2004

- [BVB14] BHOOSHAN, Shajay ; VEENENDAAL, Diederik ; BLOCK, Philippe: Particle-spring systems. In: ADRIAENSSENS, Sigrid (Hrsg.) ; BLOCK, Philippe (Hrsg.) ; VEENENDAAL, Diederik (Hrsg.) ; WILLIAMS, Chris (Hrsg.): *Shell Structures for Architecture: Form Finding and Optimization*. Routledge Chapman & Hall, 2014, S. 103–113
- [BZ08] BADER, Johannes ; ZITZLER, Eckart: HypE: An Algorithm for Fast Hypervolume-Based Many-Objective Optimization / Computer Engineering and Networks Laboratory, ETH Zürich. 2008. – Forschungsbericht
- [BZ12] BURKHARD, Rainer E. ; ZIMMERMANN, Uwe T.: *Einführung in die Mathematische Optimierung*. Springer Spektrum Verlag, 2012
- [CEPR14] COELHO, Rajan F. ; ECHENAGUCIA, Tomás M. ; PUGNALE, Alberto ; RICHARDSON, James N.: Genetic algorithms for structural design. In: ADRIAENSSENS, Sigrid (Hrsg.) ; BLOCK, Philippe (Hrsg.) ; VEENENDAAL, Diederik (Hrsg.) ; WILLIAMS, Chris (Hrsg.): *Shell Structures for Architecture: Form Finding and Optimization*. Routledge Chapman & Hall, 2014, S. 290–294
- [Cri84] CRISFIELD, A.: A Quadratic Mindlin Element Using Shear Constraints. In: *Computers & Structures* 18 (1984), S. 833–852
- [Cza11] CZAJA, Wojciech: Federvieh auf drei Beinen. In: *db deutsche bauzeitung* 10 (2011), S. 24–28
- [Deg09] DEGISCHER, H. P.: *Leichtbau - Prinzipien, Werkstoffauswahl und Fertigungsvarianten*. Wiley-VCH, 2009
- [Dem91] DEMS, Krzysztof: First- and second-order shape sensitivity analysis of structures. In: *Structural Optimization* 3 (1991), S. 79–88
- [DHT05] DEHN, Frank (Hrsg.) ; HOLSCHEMACHER, Klaus (Hrsg.) ; TUE, Nguyen V. (Hrsg.): *Faserverbundwerkstoffe Innovationen im Bauwesen Beiträge aus Praxis und Wissenschaft*. Bauwerk Verlag, 2005
- [Dim11] DIMCIC, Milos: *Structural Optimization of Grid Shells based on Genetic Algorithms*, Universität Stuttgart, Diss., 2011
- [DIN01] DIN: *DIN 1055-100:2001-03 Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 100: Grundlagen der Tragwerksplanung - Sicherheitskonzept und Bemessungsregeln, DIN - Deutsches Institut für Normung e.V.* Beuth Verlag, 2001
- [DIN06] DIN: *DIN EN ISO 14040 Umweltmanagement - Ökobilanz Anforderungen und Anleitungen, DIN - Deutsches Institut für Normung e.V.* Beuth Verlag, 2006

- [DIN10a] DIN: *DIN EN 1991-1-4 Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen - Windlasten*, DIN - Deutsches Institut für Normung e.V. Beuth Verlag, 2010
- [DIN10b] DIN: *DIN EN 1998-1:2010-12 Eurocode 8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben - Teil 1: Grundlagen, Erdbebeneinwirkungen und Regeln für Hochbauten*, DIN - Deutsches Institut für Normung e.V. Beuth Verlag, 2010
- [DIN13] DIN: *DIN EN 13782:2013-05 Fliegende Bauten - Zelte - Sicherheit; Deutsche Fassung prEN 13782:2013*, DIN - Deutsches Institut für Normung e.V. Beuth Verlag, 2013
- [DIN14] DIN: *DIN EN 15804:2014-07 Nachhaltigkeit von Bauwerken - Umweltproduktdeklarationen - Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte*, DIN - Deutsches Institut für Normung e.V. Beuth Verlag, 2014
- [Dou09] DOUMPIOTI, C.: Makro-Faserstrukturen. In: *188 Form Follows Performance - ARCH+ Verlag, Aachen* (2009)
- [EVG⁺14] EISENBACH, Philipp ; VASUDEVAN, Ragunath ; GROHMANN, Manfred ; BOLLINGER, Klaus ; HAUSER, Stephan: PARAPLUIE - ULTRA THIN CONCRETE SHELL MADE OF UHPC BY ACTIVATING MEMBRANE EFFECTS. In: *IASS Journal* 55 (2014), S. 201–212
- [FHHZ13] FUCHS, Matthias ; HARTMANN, Franziska ; HENRICH, Johanna ; ZEUMER, Martin: *SNAP - Systematik für Nachhaltigkeitsanforderungen in Planungswettbewerben*. Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) sowie des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR), 2013
- [Fib14] FIBERLINE: *Bemessungshandbuch Bemessung und Konstruktion von Tragwerken aus pultrudierten glasfaserverstärkten Kunststoffprofilen der Firma Fiberline Composites A/S*. 24.04.2014
- [Gol89] GOLDBERG, David (Hrsg.): *Genetic algorithms in search, optimization and machine learning*. Addison Wesley Longman, 1989
- [Göt00] GÖTZ, Konrad: *Die innere Optimierung der Bäume als Vorbild für technische Faserverbunde - eine lokale Approximation*, Forschungszentrum Karlsruhe Technik und Umwelt, Diss., 2000
- [GV05] GENZEL, Elke ; VOIGT, Pamela: *Kunststoffbauten Teil 1: Die Pioniere*. Weimar : Verlag der Bauhaus-Universität Weimar, 2005
- [GW13] GRUBER, Georg ; WARTZACK, Sandro: Evaluierung der orientierungsbezogenen Leichtbaugüte. In: *Lightweight Design* 5 (2013), S. 18–23
- [Hah03] HAHNEBACH, B.: *Formgedächtnislegierungen für adaptive Tragwerke*, Bauhaus-Universität Weimar and EMPA Dübendorf, Diplomarbeit, 2003

- [Har03] HARBORD, Rudolf: Lehrveranstaltung Statik der Flächentragwerke IV - Flächentragwerke- / Technische Universität Berlin Fachgebiet Statik der Baukonstruktionen. März 2003. – Forschungsbericht
- [Höc10] HÖCHST, Martin: Häkeln, Falten oder Nähen? Freiluftbar aus GFK-Schläuchen. In: *db Deutsche Bauzeitung* Jg. 144, Nr. 5 (2010), S. 66–67
- [HFSZ07] HEGGER, Manfred ; FUCHS, Matthias ; STARK, Thomas ; ZEUNER, Martin: *Energie Atlas: Nachhaltige Architektur*. Birkhäuser - Verlag für Architektur, 2007
- [HGP08] HOLZER, Christin E. ; GARLOCK, Maria E. M. ; PREVOST, Jean H.: Structural Optimization of Felix Candela's Chapel Lomas de Cuernavaca. In: *Fifth International Conference on Thin-Walled Structures, Brisbane, Australia*, 2008
- [HHR14a] HEIDENREICH, Christian ; HOLLBERG, Alexander ; RUTH, Jürgen: Big Shells — Small Footprint - Evolutionary Optimized Concrete Shell Structure. In: BRASIL, Reyolando M. (Hrsg.) ; PAULETTI, Ruy M. (Hrsg.): *Proceedings of the IASS-SLTE 2014 Symposium - Shells, Membranes and Spatial Structures: Footprints*, 2014
- [HHR⁺14b] HOLLBERG, Alexander ; HEIDENREICH, Christian ; RUTH, Jürgen ; HARTUNG, Robert ; HERZOG, Steve: Using evolutionary optimization for low-impact solid constructions. In: *Proceedings of the World Sustainable Building 2014 Barcelona*, 2014
- [HJ11] HAMMOND, Geoff ; JONES, Craig: Inventory of Carbon & Energy (ICE) Version 2.0 / University of Bath, UK Department of Mechanical Engineering Sustainable Energy Research Team (SERT). 2011. – Forschungsbericht
- [HL86] HEYMANN, Joachim ; LINGENER, Adolf: *Meßverfahren der experimentellen Mechanik*. Springer Verlag, 1986
- [Höl99] HÖLLER, Ralf: *Formfindung: Architektonische Grundlagen für den Entwurf von mechanisch vorgespannten Membranen und Seilnetzen*. Verlag Dr. Thomas Balistier, 1999
- [Hör06] HÖRMANN, Alexander: *Ermittlung optimierter Stabwerkmodelle auf Basis des Kraftflusses als Anwendung plattformunabhängiger Prozesskopplung*, Technische Universität München, Diss., 2006
- [HR14a] HEIDENREICH, Christian ; RUTH, Jürgen: PARAMETRIC OPTIMIZATION OF LIGHTWEIGHT STRUCTURES. In: OÑATE, E. (Hrsg.) ; OLIVER, J. (Hrsg.) ; HUERTA, A. (Hrsg.): *Proceedings of the 11th World Congress on Computational Mechanics (WCCM XI) 5th European Conference on Computational Mechanics (ECCM V) 6th European Conference on Computational Fluid Dynamics (ECFD VI)*, 2014

- [HR14b] HEIDENREICH, Christian ; RUTH, Jürgen: Parametrische Modelle zur Realisierung formkomplexer adaptiver Tragwerke. In: BLETZINGER, Kai-Uwe (Hrsg.) ; GEBEKKEN, Norbert (Hrsg.) ; FISCH, Ruppert (Hrsg.): *Baustatik-Baupraxis 12*, 2014, S. 521–528
- [HT81] HUGHES, T. J. R. ; TEZDUYAR, E.: Finite Elements Based Upon Mindlin Plate Theory With Particular Reference to the Four-Node Bilinear Isoparametric Element. In: *Journal of Applied Mechanics* (1981), S. 587–596
- [IBU14] IBU: *Umwelt-Produktdeklaration*. 2014. – Available online at <http://bau-umwelt.de/hp6239/Wozu-EPDs.htm>; visited on May 12th 2014.
- [Ide01] IDELBERGER, K.: Der EXPO-2000-Pavillon von Venezuela - eine sich zur Welt öffnende Blume. In: *Stahlbau - Ernst- und Sohn Verlag* 70 (2001), S. 212–214
- [Jan14] JANKE, Lars: *Tragverhalten von Betondruckgliedern mit vorgespannter Umschnürung aus Formgedächtnislegierung, Stahl oder faserverstärkten Kunststoffen*, Bauhaus-Universität Weimar, Diss., 2014
- [Jar11] JARNO, Lukasz: Concrete Prestressed Structures using Shape Memory Alloys. Constitutive Modelling. In: *Juniorstav 2.1 Concrete and masonry 2011* (2011)
- [JBT98] JÖNSSON, Asa ; BJÖRKLUND, Thomas ; TILLMANN, Anne-Marie: LCA of Concrete and Steel Buildings. In: *The International Journal of Life Cycle Assessment* 4 (1998), S. 216–224
- [JCMR05] JANKE, L. ; CZADERSKI, C. ; MOTAVALLI, M. ; RUTH, J.: Applications of shape memory alloys in civil engineering structures - Overview, limits and new ideas. In: *Materials and Structures - Springer Verlag* (2005), S. 578–592
- [Kem04] KEMMLER, Roman: *Stabilität und große Verschiebungen in der Topologie- und Formoptimierung*, Universität Stuttgart, Diss., 2004
- [Köh00] KÖHNLEIN, J.: Smart Materials - Intelligente Werkstoffe. In: *Stahlbau - Ernst- und Sohn Verlag* 69 (2000), S. 430–440
- [KJSO13] KNIPPERS, Jan ; JUNGJOHANN, Hauke ; SCHEIBLE, Florian ; OPPE, Matthias: Bio-inspirierte kinetische Fassade für den Themenpavillon One Ocean EXPO 2012 in Yesou, Korea. In: *Bautechnik - Ernst- und Sohn Verlag* 90 (2013), S. 341–347
- [KJZ14] KHOULI, Sebastian E. ; JOHN, Viola ; ZEUMER, Martin: *Nachhaltig konstruieren - Vom Tragwerksentwurf bis zur Materialwahl: Gebäude ökologisch bilanzieren und optimieren*. Detail Green Books, 2014
- [KK12] KNIPPERS, Jan ; KAMP, Florian: Einfluss parametrischer Architektur auf die Tragwerkplanung und umgekehrt. In: *Sofistik Seminar 2012* (2012)

- [Lag08] LAGOUDAS, D. C.: *Shape Memory Alloys - Modeling and Engineering Applications*. New York : Springer Verlag, 2008
- [LAS14] LOCHNER-ALDINGER, Irmgard ; SCHUMACHER, Axel: Homogenization method - Distribution of material densities. In: ADRIAENSSENS, Sigrid (Hrsg.) ; BLOCK, Philippe (Hrsg.) ; VEENENDAAL, Diederik (Hrsg.) ; WILLIAMS, Chris (Hrsg.): *Shell Structures for Architecture: Form Finding and Optimization*. Routledge Chapman & Hall, 2014, S. 211–223
- [Lem09] LEMAITRE, Christine: Topology Optimized Adaptive Truss Structures. In: *Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium 2009, Valencia, 2009*
- [Lin14] LINKWITZ, Klaus: Force Density Method. In: ADRIAENSSENS, Sigrid (Hrsg.) ; BLOCK, Philippe (Hrsg.) ; VEENENDAAL, Diederik (Hrsg.) ; WILLIAMS, Chris (Hrsg.): *Shell Structures for Architecture: Form Finding and Optimization*. Routledge Chapman & Hall, 2014, S. 59–69
- [Lip07] LIPKA, Andreas: *Verbesserter Materialeinsatz innovativer Werkstoffe durch die Topologieoptimierung*, Universität Stuttgart Institut für Baustatik und Baudynamik, Diss., 2007
- [LK14] LEDDEROSE, Lukas ; KLOFT, Harald: Magnetic rearrangement of Steel Fibers in UHPFRC. In: *Proceedings of the IASS-SLTE 2014 Symposium - Shells, Membranes and Spatial Structures: Footprints*, 2014
- [MAJ⁺13] MENNA, Costantino ; ASPRONE, Domenico ; JALAYER, Fatemeh ; PROTA, Andrea ; MANFREDI, Gaetano: Assessment of ecological sustainability of a building subjected to potential seismic events during its lifetime. In: *The International Journal of Life Cycle Assessment* 18 (2013), S. 504–515
- [Mar12] MARTI, Peter: *Baustatik, Grundlagen, Stabtragwerke, Flächentragwerke*. Ernst, 2012
- [Mat97] MATTHECK, Claus: *Design in der Natur Der Baum als Lehrmeister*. Rombach Verlag, 1997
- [Mau98] MAUTE, Kurt: *Topologie- und Formoptimierung von dünnwandigen Tragwerken*, Universität Stuttgart Institut für Baustatik, Diss., 1998
- [MCBJ09] MOTAVALLI, Masoud ; CZADERSKI, Christoph ; BERGAMINI, Andrea ; JANKE, Lars: Shape Memory Alloys for Civil Engineering Structures - on the way from vision to reality. In: *Architecture Civil Engineering Environment* 4 (2009), S. 81–94
- [Men10] MENGES, Achim: Architektonische Form- und Materialwerdung am Übergang von Computer Aided zu Computational Design. In: *Detail - Zeitschrift für Architektur und Baukultur* 5/2010 (2010), S. 420–425

- [MHH14] MARA, Valbona ; HAGHANI, Reza ; HARRYSON, Peter: Bridge decks of fibre reinforced polymer (FRP): A sustainable solution. In: *Construction and Building Materials* 50 (2014), S. 190–199
- [MHW95] MICHAELI, Walter ; HUYBRECHTS, Dirk ; WEGENER, Martin: *Dimensionieren mit Faserverbundkunststoffen Einführung und praktische Hilfen*. Carl Hanser Verlag München, 1995
- [MK14] MICHALATOS, Panagiotis ; KAIJIMA, Sawako: Eigenshells Structural patterns on modal forms. In: ADRIAENSSENS, Sigrid (Hrsg.) ; BLOCK, Philippe (Hrsg.) ; VEENENDAAL, Diederik (Hrsg.) ; WILLIAMS, Chris (Hrsg.): *Shell Structures for Architecture: Form Finding and Optimization*. Routledge Chapman & Hall, 2014, S. 195–209
- [Mol11] MOLDENHAUER, Herbert: Berechnung variabler Faserverläufe zur Optimierung von Compositestrukturen. In: *Lightweight Design* 1 (2011), S. 51–56
- [MSR98] MAUTE, K. ; SCHWARZ, St. ; RAMM, E.: Structural Optimization - The Interaction between Form and Mechanics. In: *76th Annual GAMM Conference*, 1998
- [MW90] MICHAELI, Walter ; WEGENER, Martin: *Einführung in die Technologie der Faserverbundwerkstoffe*. Carl Hanser Verlag München, 1990
- [MW10] MENZEL, Stephan ; WIEDEMANN, Bernhard: Methode zur Auslegung tragender Bauteile aus Faserverbundkunststoff. In: *Lightweight Design* 6 (2010), S. 48–53
- [Ner05] NERDINGER, Winfried (Hrsg.): *Frei Otto. Das Gesamtwerk: Leicht bauen - natürlich gestalten*. Birkhäuser - Verlag für Architektur, 2005
- [Neu14] NEUHÄUSER, Stefan: *UnUntersuchung zur Homogenisierung von Spannungsfeldern bei adaptiven SchalentraSchalen mittels Auflagerverschiebung*, Universität Stuttgart, Diss., 2014
- [OB14] OCHSENDORF, John ; BLOCK, Philippe: Exploring shell forms. In: ADRIAENSSENS, Sigrid (Hrsg.) ; BLOCK, Philippe (Hrsg.) ; VEENENDAAL, Diederik (Hrsg.) ; WILLIAMS, Chris (Hrsg.): *Shell Structures for Architecture: Form Finding and Optimization*. Routledge Chapman & Hall, 2014, S. 7–12
- [Paw06] PAWLOWSKI, Robert: *Adaptive Dachtragwerke Entwicklung eines Entwurfsverfahrens Betrachtung ausgewählter Aspekte*, Technische Universität München, Diss., 2006
- [PES14] PUGNALE, Alberto ; ECHENAGUCIA, Tomàs M. ; SASSONE, Mario: Computational morphogenesis Design of freeform surfaces. In: ADRIAENSSENS, Sigrid (Hrsg.) ; BLOCK, Philippe (Hrsg.) ; VEENENDAAL, Diederik (Hrsg.) ; WILLIAMS, Chris (Hrsg.): *Shell Structures for Architecture: Form Finding and Optimization*. Routledge Chapman & Hall, 2014, S. 225–236

- [PI13] PAYNE, Andrew ; ISSA, Rajaa: *Grasshopper Primer For Version 0.6.0007*. Website, 2013. – online at http://www.liftarchitects.com/storage/research/Grasshopper%20Primer_Second%20Edition_090323.pdf; visited on May 31th 2013.
- [Poh99] POHLHEIM, Hartmut: *Evolutionäre Algorithmen Verfahren, Operatoren und Hinweise für die Praxis*. Springer Verlag, 1999
- [Pre15] PREISINGER, Clemens: *Parametric Structural Modelling Karamba User Manual for Version 1.1.0*, March 8, 2015
- [Rap03] RAPP, H.: *Aktive Strukturen an der uniBW - Seminar für Leichtbau 22.10.2003 / Institut für Leichtbau, Universität der Bundeswehr München, Germany. 2003. – Forschungsbericht*
- [RC09] RG-COMPOSITES: *Faserverbundwerkstoffe Composite materials Handbook*. 2. 2009
- [Rec94] RECHENBERG, Ingo: *Evolutionsstrategie '94*. frommann-holzboog, 1994
- [RG10] RUTH, Jürgen ; GUMPP, Rainer: *Screenhaus.SOLAR - Ein Kino im Solarkleid EnergyTerminal.SOLAR - Ein modernes Lagerfeuer*. Verlag der Bauhaus-Universität Weimar, 2010
- [RGH12] RUTH, Jürgen ; GUMPP, Rainer ; HEIDENREICH, Christian: *Aktive Faser-Verbundwerkstoffe für Adaptive Systeme - Abschlussbericht*. Fraunhofer Irb Verlag, 2012
- [RHP12] RUTH, Jürgen ; HEIDENREICH, Christian ; PHILIPP, Jana ; RUTH, Jürgen (Hrsg.) ; GUMPP, Rainer (Hrsg.): *Shells for Shelter Bionisch inspirierte Notunterkünfte*. Verlag der Bauhaus-Universität Weimar, 2012
- [Ric89] RICHTER, I.: Reißlackverfahren. In: ROHRBACH, Christof (Hrsg.): *Handbuch für experimentelle Spannungsanalyse*. VDI-Verlag Düsseldorf, 1989
- [Rut13] RUTTEN, David: Galapagos on the logic and limitations of generic solvers. In: *Architectural Design - Computation Works, The Building of Algorithmic Thought* 222 (2013), S. 132–135
- [Rut15] RUTH, Jürgen (Hrsg.): *FOGEB Forschungsgruppe Green Efficient Buildings Forschungsbericht (Kurzfassung)*. 2015
- [Rys03] RYSZARD, A. D.: Environmental Considerations to Structural Material Selections for a Bridge. In: *European Bridge Engineering Conference Lightweight Bridge Decks, Rotterdam*, 2003
- [San14] SANTIFALLER, Enrico: Unikat aus Unikaten Elefantenhaus Zoo Zürich, CH. In: *Deutsche Bauzeitschrift* 12 (2014), S. 20–27

- [SBK12] SCHNEIDER, S. ; BIELIK, M. ; KÖNIG, R.: Form follows performance? Kritische Faktoren bei der Modellbildung zur Performanceoptimierung von Gebäudeformen. In: *Bauhaus.Solar Kongress, Erfurt, 2012*, 2012
- [Sch75] SCHWEFEL, Hans-Paul: *Evolutionstrategie und numerische Optimierung*, Technische Universität Berlin, Diss., 1975
- [Sch03] SCHILLING, Steffi: *Beitrag zur Lösung ingenieurtechnischer Entwurfsaufgaben unter Verwendung Evolutionärer Algorithmen*, BAUHAUS-UNIVERSITÄT WEIMAR, Diss., 2003
- [Sch05] SCHUMACHER, Axel: *Optimierung mechanischer Strukturen*. Springer Verlag, 2005
- [Sch12] SCHÄFER, Martin: *Das Dach der Zukunft ist nicht starr*. sep 2012. – Available online at <http://www.stuttgarter-zeitung.de/inhalt.architektur-das-dach-der-zukunft-ist-nicht-starr.1cf71dbc-3694-4f90-b973-470e3baf317a.html>; visited on September 13th 2012.
- [Sch14] SCHUMACHER, Patrik: The congeniality of architecture and engineering. In: ADRIAENSSENS, Sigrid (Hrsg.) ; BLOCK, Philippe (Hrsg.) ; VEENENDAAL, Diederik (Hrsg.) ; WILLIAMS, Chris (Hrsg.): *Shell Structures for Architecture: Form Finding and Optimization*. Routledge Chapman & Hall, 2014, S. 271–273
- [SDH⁺11] SENATORE, Gennaro ; DUFFOUR, Philippe ; HANNA, Sean ; LABBÉ, Fred ; WINSLOW, Pete: Adaptive Structures for Whole-Life Energy Savings. In: *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures* 52 (2011), S. 233–240
- [SK99] SCHLAICH, Jörg ; KNIPPERS, Jan: Dreifeld-Klappbrücke Kiel-Hörn. In: *Bauingenieur* 74 (1999), S. 213–217
- [SKO⁺06] SAWAGUCHI, Takahiro ; KIKUCHI, Takehito ; OGAWA, Kazuyuki ; KAJIWARA, Setsuo ; IKEO, Yosaku ; KOJIMA, Masarou ; OGAWA, Takatoshi: Development of Prestressed Concrete Using Fe-Mn-Si-Based Shape Memory Alloys Containing NbC. In: *Materials Transactions* 47 (2006), S. 580–583
- [Sma12] SMARTSHELL, Stuttgart: *Stuttgart SmartShell*. website, sep 2012. – Available online at <http://smartshell-stuttgart.de/>; visited on September 13th 2012.
- [SOF08] SOFiTiK ; SOFiSTiK AG (Hrsg.): *SOFiSTiK - Produktbroschüre 2008*. Bruckmannring 38, 85764 Oberschleißheim: SOFiSTiK AG, 2008
- [SP04] SCHULTZ, L. ; PETRY, W.: Änderung von Mikrostruktur und Form fester Werkstoffe durch äußere Magnetfelder / Antrag auf Einrichtung eines DFG

- Schwerpunktprogramms; Änderung von Mikrostruktur und Form fester Werkstoffe durch äußere Magnetfelder. 2004. – Forschungsbericht
- [SSM05] SEIFRIED, Gerhard ; SANDNER, Dieter ; MOK, Daniel: Stuttgart 21, Formentwicklung und Modellierung der neuen Bahnhofshalle. In: *Sofistik Seminar 2005* (2005)
- [Stö01] STÖRMER, Jan: Eingangshalle der Universität Bremen. In: *Detail - Zeitschrift für Architektur und Baukultur* 5 (2001), S. 876–880
- [Sta09] STAHR, Alexander: *Das wohltemperierte Netz - Zum Konstruktiven Entwurf direkt verglaste Stabnetze auf Freiformflächen*, Bauhaus-Universität Weimar, Diss., 2009
- [Ste97] STEINMANN, F.: *Modellbildung und computergestütztes Modellieren in frühen Phasen des architektonischen Entwurfs*, Bauhaus-Universität Weimar, Diss., 1997
- [SW01] SOBEK, Werner ; WEISS, Ingo: Eine Stahl-Glashalle als neuer zentraler Eingangsbereich der Universität Bremen. In: *Stahlbau - Ernst- und Sohn Verlag* 70 (2001), S. 309–313
- [Teu04] TEUFFEL, P.: Entwerfen adaptiver Strukturen. In: *ILEK TU Stuttgart* (2004)
- [TH83] TESSLER, A. ; HUGHES, T. J. R.: An improved Treatment of Transverse Shear in the Mindlin-Type Four-Node Quadrilateral Element. In: *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 39 (1983), S. 311–335
- [Tre99] TREBERSPURG, Martin: *Neues Bauen mit der Sonne: Ansätze zu einer klimagerechten Architektur*. Springer Verlag, 1999
- [Tua08] TUAN, Vu A.: *Beitrag zur Optimierung von Tragwerken aus Stahl mittels Evolutionärer Algorithmen*, Bauhaus-Universität Weimar, Diss., 2008
- [VB14] VEENENDAAL, Diederik ; BLOCK, Philippe: Comparison of form-finding methods. In: ADRIAENSSENS, Sigrid (Hrsg.) ; BLOCK, Philippe (Hrsg.) ; VEENENDAAL, Diederik (Hrsg.) ; WILLIAMS, Chris (Hrsg.): *Shell Structures for Architecture: Form Finding and Optimization*. Routledge Chapman & Hall, 2014, S. 115–129
- [VDI06] VDI2014: *Blatt 3 Entwicklung von Bauteilen aus Faser-Kunststoff-Verbund Berechnungen*. September 2006
- [VDI12] VDI6224: *Blatt 2 Bionische Optimierung Anwendung biologischer Wachstumsgesetze zur strukturmechanischen Optimierung technischer Bauteile*. August 2012
- [Wal11] WALSER, Alexander F.: *Formfindung von Schalen mit numerischen Hängemodellen*, Universität Stuttgart, Diplomarbeit, 2011

- [WDN05] WEBER, F. ; DISTL, H. ; NÜTZEL, O.: Versuchsweiser Einbau eines adaptiven Seildämpfers in eine Schrägseilbrücke. In: *Beton- und Stahlbetonbau - Ernst- und Sohn Verlag* 100 (2005), S. 582–589
- [Wei99] WEICKER, Karsten: Evolutionäre Algorithmen. In: *Softcomputing - Tagungsband zum ersten Softcomputing -Treffen* Informatikverbund Stuttgart, 1999, S. 27–40
- [Wei07] WEICKER, Karsten: *Evolutionäre Algorithmen*. Teubner Verlag, 2007
- [Wei08] WEILANDT, Agnes: *Adaptivität bei Flächentragwerken*, Universität Stuttgart, Diss., 2008
- [Wei09] WEILANDT, Agnes: Adaptive planar structures. In: *Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium 2009, Valencia*, 2009
- [Wei13] WEICKGENANT, Martin: *Konzepte zur modellbasierten Regelung adaptiver Schalentragsysteme*, Universität Stuttgart, Diss., 2013
- [WH15] WÜSTENHAGEN, Sven ; HEIDENREICH, Christian: Adaptive Verschattung. In: RUTH, Jürgen (Hrsg.): *FOGEB Forschungsgruppe Green Efficient Buildings Forschungsbericht (Kurzfassung)*. Bauhaus-Universität Weimar Professuren Tragwerkslehre & Massivbau II, 2015
- [Wie10] WIESMANN, Jörg: Eine Stahlschale als Überdachung der archäologischen Grabung St. Antony, Oberhausen. In: *Sofistik Seminar 2010* (2010)
- [Wil14] WILLIAMS, Chris: What is a shell? In: ADRIAENSSENS, Sigrid (Hrsg.) ; BLOCK, Philippe (Hrsg.) ; VEENENDAAL, Diederik (Hrsg.) ; WILLIAMS, Chris (Hrsg.): *Shell Structures for Architecture: Form Finding and Optimization*. Routledge Chapman & Hall, 2014, S. 21–31
- [Win14] WINSLOW, Peter: Multi-criteria gridshell optimization. In: ADRIAENSSENS, Sigrid (Hrsg.) ; BLOCK, Philippe (Hrsg.) ; VEENENDAAL, Diederik (Hrsg.) ; WILLIAMS, Chris (Hrsg.): *Shell Structures for Architecture: Form Finding and Optimization*. Routledge Chapman & Hall, 2014, S. 181–193
- [WMR⁺13] WAIMER, Frederic ; MAGNA, Riccardo L. ; REICHERT, Steffen ; SCHWINN, Tobias ; MENGES, Achim ; KNIPPERS, Jan: Bionisch-inspirierte Faserverbundstrukturen Prinzipien für Fertigung und Auslegung. In: *Bautechnik - Ernst- und Sohn Verlag* 90 (2013), S. 766–771
- [WS98] WEI, Z. G. ; SANDSTRÖM, R.: Shape-memory materials and hybrid composites for smart systems Part I: Shape-memory materials. In: *Journal of Materials Science* 33 (1998), S. 3743–3762
- [Zim07] ZIMMERMANN, Gregor: *Membran Beton Gitterschalen Tragwerke - Entwicklung und Vorbemessung*, Universität Kassel, Diss., 2007

A Softwaregrundlagen

A.1 parametrische Designsoftware Rhinoceros3D und Grasshopper

Parametrische Geometriemodelle finden im Planungsalltag immer häufiger Einzug. Die Gründe hierfür sind vor allem im Bereich der Realisierung von Freiformflächen zu finden, da hierbei häufig eine Vielzahl unterschiedlicher Bauteile generiert und bearbeitet werden müssen. Sofern die Bearbeitung dieser Einzelteile nicht händisch „Bauteil für Bauteil“ erfolgen soll, kann der Einsatz parametrischer Modelle sinnvoll sein. Im Rahmen dieser Arbeit wird auf die CAD-Software RHINOCEROS3D von McNeel zurückgegriffen. In dem Programm ist die Option „Historie aufnehmen“ implementiert. Unter Nutzung dieses Features können Änderungen an der Geometrie aufgezeichnet und später widerrufen oder unter geänderten Randbedingungen einzelne Arbeitsschritte wiederholt ausgeführt werden. Von dieser Möglichkeit ausgehend wird von David Rutten die graphische Programmieroberfläche GRASSHOPPER im CAD-Programm RHINOCEROS3D entwickelt. In dieser graphischen Programmieroberfläche können komplette Strukturen grundlegend parametrisch aufgebaut werden. Auf diese Weise können basierend auf den definierten Parametern und zugehörigen Bildungsregeln vielfältige Geometriemanipulationen realisiert werden. Eine detaillierte Beschreibung der Möglichkeiten im Umgang mit Grasshopper sind [PI13] zu entnehmen. Der Programmaufsatz Grasshopper wird derzeit als Open-Source-Projekt betrieben, wodurch die Entwicklung von vielen Programmieren und Anwendern vorangetrieben wird. So kommt es zu einem kontinuierlichen Ausbau und einer vielseitigen Weiterentwicklung.

A.2 Strukturanalysesoftware *Sofistik*

Im Rahmen dieser Arbeit werden Strukturanalyseprogramme der SOFISTIK AG eingesetzt. Die Firma SOFISTIK ist im Bereich der Planungssoftware ein führender Anbieter und gilt in vielen Bereichen der Ingenieurbaustandards als Vorreiter. Wie in Abbildung A.1 erkennbar ist, besteht das umfangreiche Gesamtprogrammsystem aus vielen einzelnen Modulen. Diese einzelnen Programmbausteine können für die betreffenden Aufgaben separat oder über die verbindende Gesamtdatenbasis genutzt werden. Auf diese Weise können sowohl „spezielle Teilaufgaben“ wie auch „komplexe Gesamtsysteme“ untersucht, berechnet und dimensioniert werden. Zu den nennenswertesten Berechnungsmöglichkeiten gehören unter anderem:

- die lineare, nichtlineare und dynamische Berechnung von Finite-Elemente-Strukturen,
- die Formfindung von Membranstrukturen unter Berücksichtigung isotroper Vorspannung
- und die Generierung der Zuschnittflächen von Membranstrukturen.

Des Weiteren sind die Produkte der SOFISTIK AG aufgrund vielfältiger Eingabemöglichkeiten und Schnittstellenstrukturen für die unterschiedlichsten Aufgaben einsetzbar. Die Eingabe der zu berechnenden Strukturen kann sowohl textbasiert, über eine speziell entwickelte Programmiersprache (CADINP), oder graphisch (SOFIPLUS bzw. SOFISTIK STRUCTURAL DESKTOP), auf Basis eines CAD-Programmes, erfolgen. Diese grundlegend unterschiedlichen Eingabevarianten haben trotz komplett verschiedener Herangehensweisen ihre Berechtigung und werden sogar teilweise parallel eingesetzt. Die textbasierte Eingabevariante erfordert aufgrund der hinterlegten Programmiersprache und Syntax eine andere Einarbeitung als die CAD-basierte Eingabemöglichkeit. Dennoch bietet gerade die textbasierte Eingabeform die Möglichkeit einer zügigen Strukturanpassung und -berechnung, wobei nur einzelne Parameter (z.B. Knotenkoordinaten oder Profilwerte) geändert werden müssen. Die Nutzung der textbasierten Eingabeform bietet eine hervorragende Verknüpfungsmöglichkeit zwischen parametrischer Geometrierstellung und Finite-Elemente-Berechnung. Auf diese Weise können vielfältige Strukturvarianten erzeugt, berechnet und optimiert werden.

Die Finite-Elemente-Software SOFISTIK wird vor allem bei der Entwicklung und Berechnung von leichten Flächentragwerken und Formfindungsaufgaben eingesetzt. Die Gründe hierfür sind:

- Formfindung nach der Membrantheorie
- Berücksichtigung orthotroper Vorspannung
- Formfindung von pneumatisch gestützten Konstruktionen

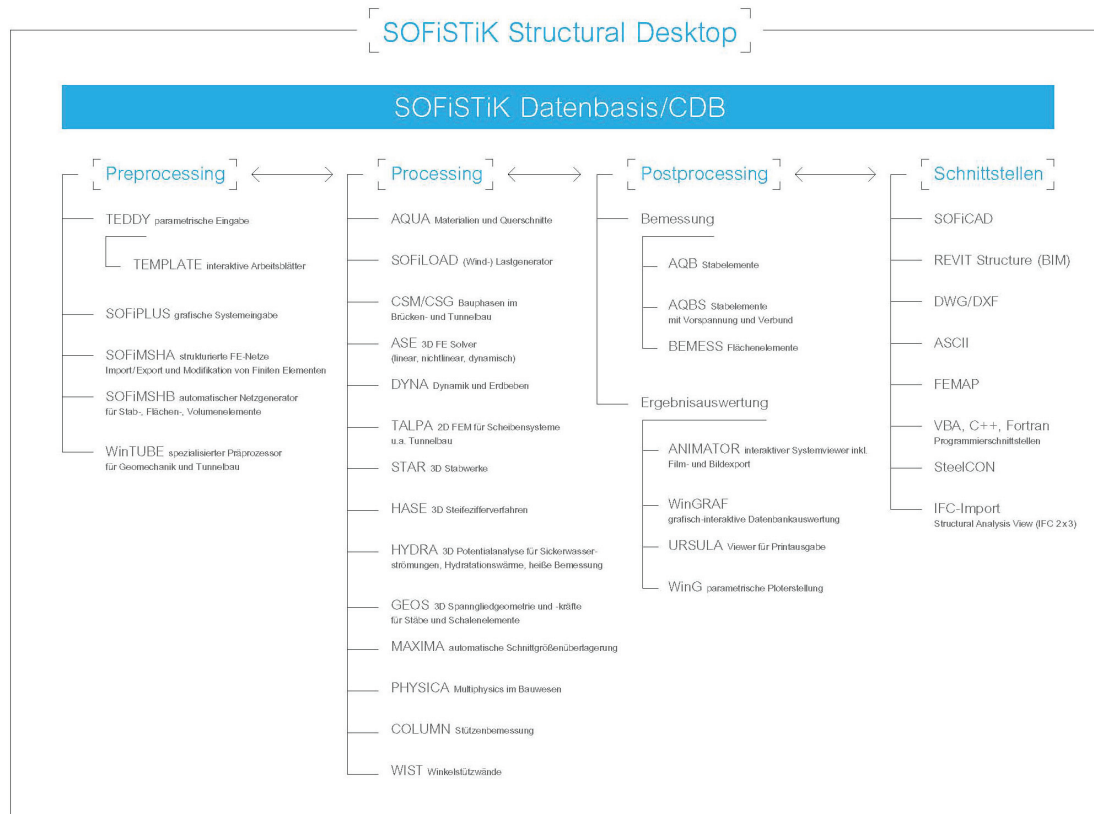


Abbildung A.1: Gesamtüberblick Sofistik Datenbasis CDB [SOF08]

- Zuschnittgenerierung der formgefundenen Strukturen, nach [SOF08].

A.3 parametrische Finite-Elemente-Berechnungssoftware

Im Rahmen der freien Erweiterbarkeit der parametrischen bzw. algorithmischen Geometriemodellierungssoftware „Grasshopper“ entwickelt Clemens Preisinger und sein Team das Finite-Elemente-Berechnungstool KARAMBA3D [Pre15]. Hierbei werden auf Basis der Geometriemodellierung Erweiterungen hinsichtlich einer statischen bzw. dynamischen Analyse ergänzt. Somit können Stab-, Flächen- und Seiltragwerke berechnet werden. Ebenso können leichte Flächentragwerke einer Formfindung unterzogen werden. Die Auswertung erfolgt in graphischer Form. Dieses Tool ist vollständig in Grasshopper implementiert und kann auf diese Weise Strukturberechnungen in Echt-Zeit durchführen. Die vollständige Grasshopper-Integration ermöglicht die Nutzung sämtlicher weiterer implementierter Module. So können neben einer Berechnung auch Optimierungen durchgeführt werden.



Abbildung A.2: Karamba3D - Panel in Grasshopper3D

B Schnittstellenentwicklung — StrukturDatenTransformator

Die im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelte Schnittstellentechnologie STRUKTURDATENTRANSFORMATOR umfasst ein breites Leistungsspektrum im Bereich der Strukturoptimierung und der Schnittstellentechnologie. Mit Hilfe dieser Schnittstelle wird eine Verbindung zwischen parametrischer CAD-Software und Strukturberechnungsprogrammen hergestellt, wobei verschiedene Optimierungsalgorithmen und -werkzeuge integriert werden können. Die Programmierung des Moduls erfolgt beispielhaft in Visual Basic (VB) und Grasshopper, vgl. Abschnitt A.1, kann aber auf andere Softwaretechnologien übertragen werden. Als Strukturanalysesoftware kommt hierbei *Sofistik* zum Einsatz. Die Programmierung in der graphischen Oberfläche von Grasshopper ermöglicht die Nutzung verschiedener Synergieeffekte. Es ist keine eigene Oberfläche (GUI) zu programmieren. Auf die bereits in *Grasshopper* implementierten Module und Optimierungswerkzeuge kann zurückgegriffen werden. Ebenso kann die Schnittstelle STRUKTURDATENTRANSFORMATOR auf einfache Art und Weise erweitert und in Bezug auf andere Fragestellungen ausgeweitet werden.

Nachfolgend sind die Anwendungsmöglichkeiten der Schnittstelle verdeutlicht.

Der Kernpunkt der Schnittstelle stellt die Datenübertragung zwischen parametrischer CAD-Umgebung und der Finite-Elemente-Software dar, vgl. Abb. B.1. Auf Basis der parametrischen Geometriedefinition wird die Berechnungsdatei für die statische Analyse erstellt. Hierbei ist der Syntax des Berechnungsprogramms zu folgen.

Die Berechnung wird unter Anwendung der externen Berechnungssoftware durchgeführt, wobei automatisierte Startbefehle Anwendung finden, vgl. Abb. B.3. In diesem Fall werden die im textbasierten CADINP-Format generierten Strukturen berechnet und anschließend die Ergebnisse ausgewertet. Bei der Ergebnisauswertung besteht die Möglichkeit einer rein tabellarischen Auswertung wie auch einer graphischen Auswertung hinsichtlich Verformungen, Spannungen und Eigenfrequenzen. Hierzu werden die Daten aus der Datenbasis (z.B. *.cdb) mit Hilfe von entwickelten Programmialgorithmen aufbereitet und in ein allgemein lesbares und universell nutzbares Format (z.B. *.txt, *.xls) überführt. Die generierten Inhalte werden dabei nach Knotenkoordinaten, Elementenparametern, Auflagerkräften, Spannungen, Verformungen, usw. sortiert. Anschließend können diese Werte in der parametrischen Programmieroberfläche über eine allgemeine Schnittstelle (z.B. txt-Schnittstelle) eingelesen und tabellarisch oder grafisch dargestellt werden. Auf diese

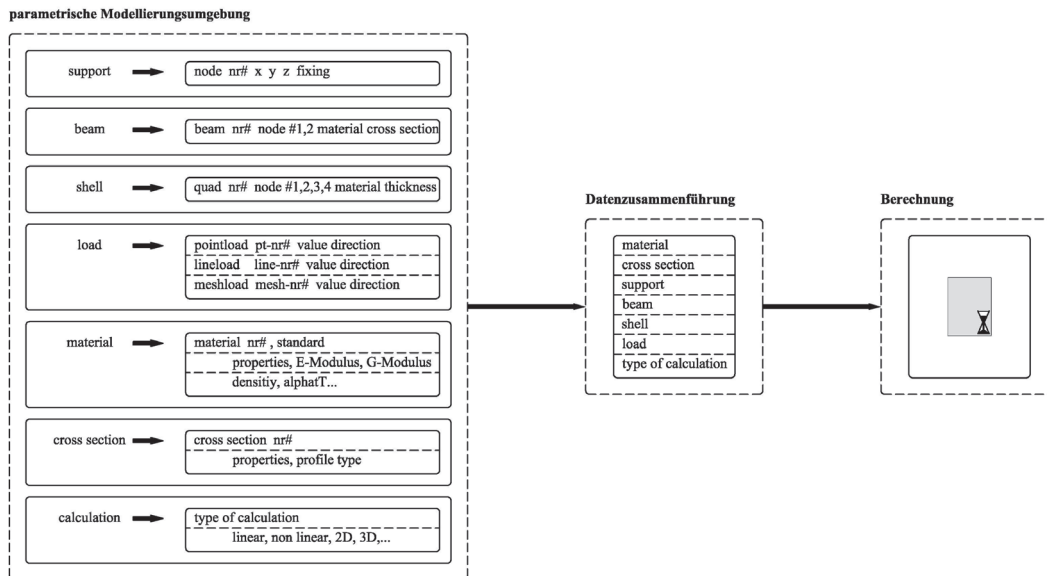


Abbildung B.1: Erstellung Berechnungsdatei und Datenübertragung

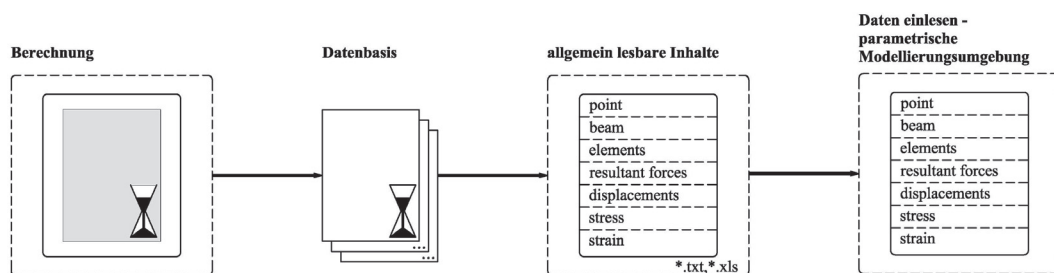


Abbildung B.2: Datenimport aus Berechnungsdatenbank in CAD-Modellierungsumgebung

Weise ist eine direkte Rückkopplung zwischen parametrischer Geometrie- und Strukturgenerierung, FE-Berechnung und Ergebnisrückübertragung möglich. So können sämtliche Ergebnisse direkt neben der Ausgangsstruktur analysiert werden. Außerdem besteht die Möglichkeit, die Berechnungsergebnisse in der weiteren parametrischen Projektbearbeitung einfließen zu lassen. So können beispielsweise die Ergebnisse der Formfindung sofort mit der Ausgangsstruktur verglichen und eventuell angepasst werden. Eine aufwändige Neumodellierung entfällt, vgl. Abb. B.2.

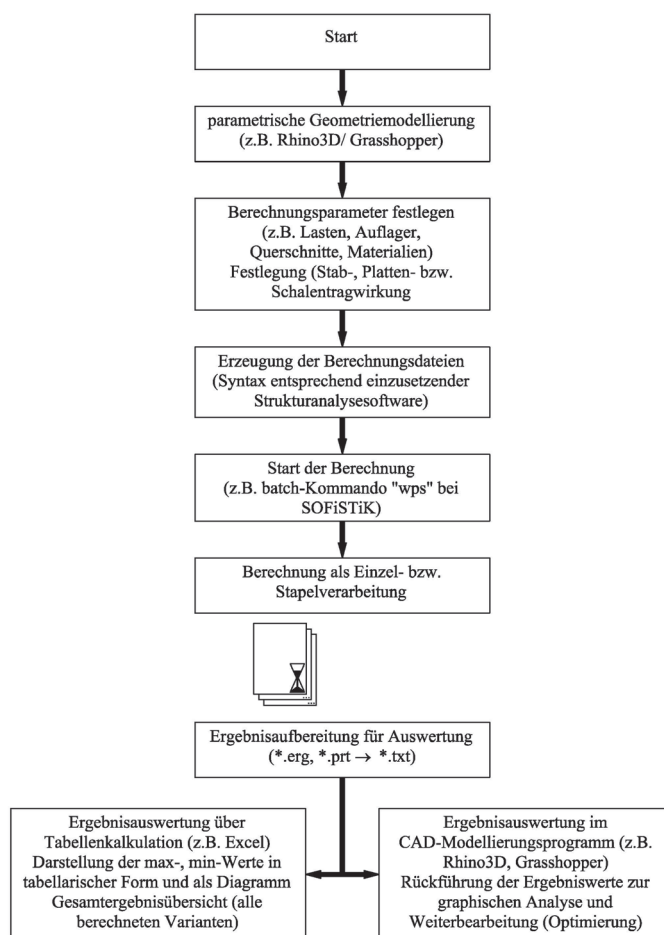


Abbildung B.3: Ablauf einer Einzelverarbeitung

Zudem kann auf Basis der neuen Ausgangsstruktur ein weiterer Berechnungsdurchlauf gestartet werden, eine kontinuierliche Optimierung wird auf diese Weise möglich, vgl. Abb. B.4. Die Optimierung unterliegt in diesem Fall definierten und überprüften Optimierungskriterien. Auf Basis der Schnittstellentechnologie werden sämtliche Berechnungsergebnisse in gesonderten Ordnern abgelegt. Auch können alle generierte Strukturen wiederhergestellt und weiterverarbeitet werden. Die Weiterverarbeitung im Hinblick auf spätere Planungsphasen ist möglich.

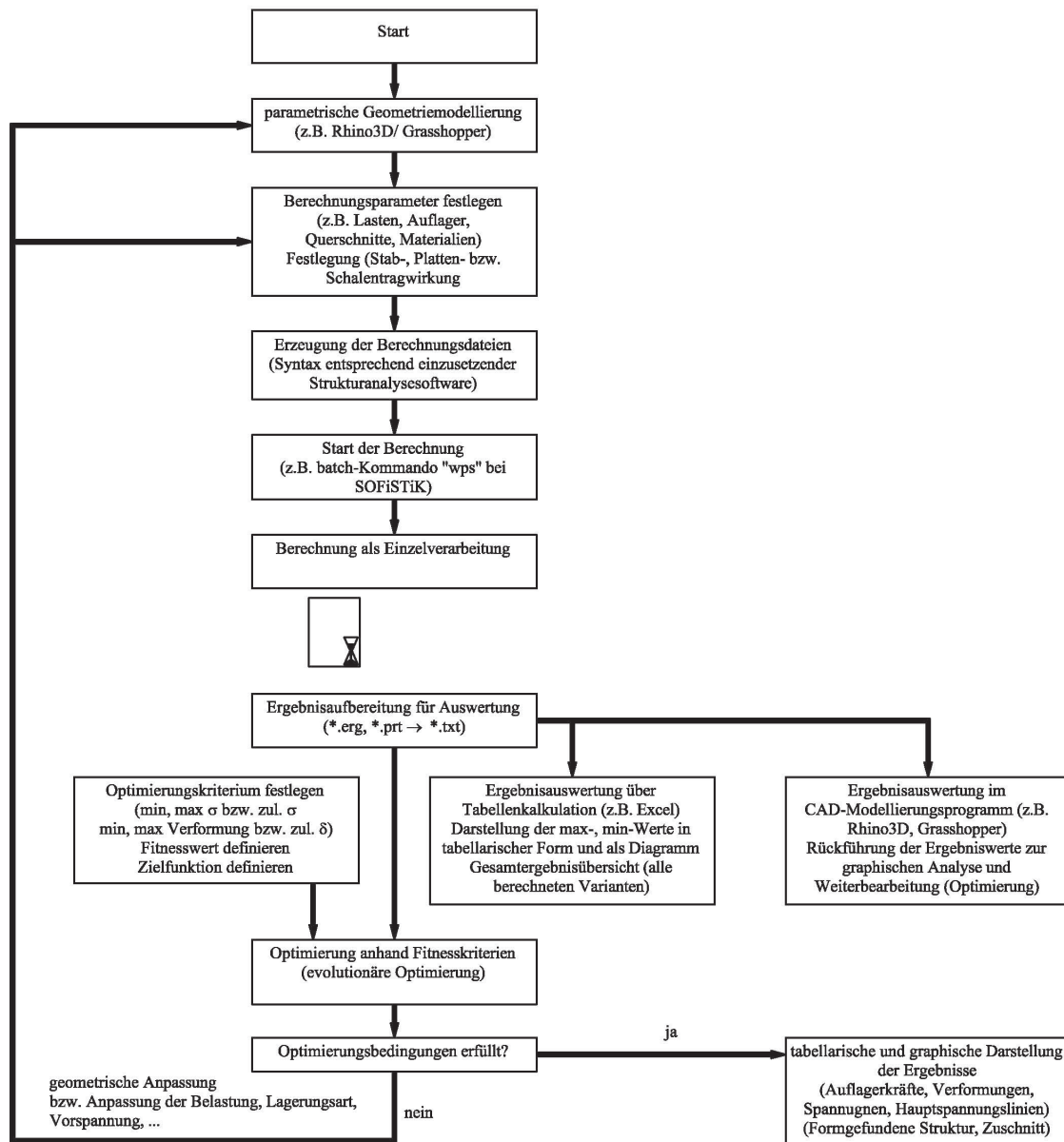


Abbildung B.4: Ablauf einer Stapelverarbeitung